



Munich Personal RePEc Archive

## **Renewable energy in Iran's electricity market**

Bibak, Baran

Allame Tabatabaee University

4 August 2019

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/105489/>  
MPRA Paper No. 105489, posted 27 Jan 2021 21:18 UTC

# انرژی‌های تجدیدپذیر در بازار برق ایران

## Renewable Energy in Iran's Electricity Market

Baran Bibak<sup>1</sup>

### English Abstract:

In this chapter, we review different energy sources that are used and implemented in Iran's electricity market. Specifically, we focus on the renewable energy sources that are in place in the country, e.g. hydropower, wind, and solar. We review the technology and the capacities of renewable energy production as well as the potential future plans for expanding the renewable energy sector in Iran.

### Persian Abstract:

در این فصل مروری میکنیم بر منابع مختلف انرژی که در بازار برق ایران وجود دارد. مشخصاً، بر منابع انرژی تجدیدپذیر تمرکز خواهیم کرد. تکنولوژی‌های مربوطه را مرور می‌کنیم. و به پتانسیل‌های این بخش خواهیم پرداخت. امید که قبول واقع افتد.

**Keywords:** Electricity Market; Renewable Energy; Alternative Energy Sources

**JEL Codes:** Q20; Q42; Q28

## فهرست مطالب

5	انرژی های نو.....
5	1-1 مقدمه.....
5	1-1-1 هدف پروژه.....
6	2-1 انرژی در گذر زمان <sup>[8]</sup> .....
9	3-1 تولید انرژی آبی (Hydropower) <sup>[7]</sup> .....
9	1-3-1 تعریف.....
9	2-3-1 نیروگاههای آبی.....
12	4-1 سوخت های هیدروژنی <sup>[12]</sup> .....
13	5-1 جزرومد.....
16	6-1 انرژی امواج <sup>[12]</sup> .....
18	7-1 تبدیل انرژی گرمای اقیانوسها (OTEC) <sup>[7]</sup> .....
19	1-7-1 انواع سیستم های OTEC.....
21	2-7-1 خلاصه.....
23	8-1 انرژی زمین گرمایی <sup>[7]</sup> .....
25	1-8-1 تعریف-انرژی زمین گرمایی (Geothermal Energy).....
25	2-8-1 ساختار داخلی زمین.....
26	3-8-1 نیروگاههای زمین گرمایی.....
27	4-8-1 انواع نیروگاههای زمین گرمایی.....
30	8-8-1 نیروگاههای زمین گرمایی در آمریکا <sup>[9]</sup> .....
31	9-8-1 خلاصه.....
33	10-8-1 مزیت های انرژی زمین گرمایی.....
33	9-1 انرژی باد <sup>[7]</sup> .....
34	1-9-1 تعریف انرژی باد.....
36	2-9-1 انواع توربین های بادی.....
39	2-9-1 نیروگاههای بادی.....

40	1-9-3 اجزای یک توربین بادی.....
42	1-9-3 خلاصه.....
43	انرژی خورشیدی.....
43	2-1 مقدمه.....
43	2-2 تابش خورشیدی.....
45	2-3 نگاه کلی به تولید برق خورشیدی.....
45	2-4 محدودیت ها.....
48	2-5 انواع نیروگاههای حرارتی خورشیدی.....
48	2-5-1 مقدمه.....
50	2-5-2 نیروگاه خورشیدی سلولهای نوری (فتوولتاییک) <sup>[1]</sup> .....
54	2-5-2-1 ساختار فیزیکی <sup>[2]</sup> .....
56	2-5-2-2 مزایای سلول های فتوولتاییک.....
57	2-5-2-5 معایب نیروگاههای سلول نوری.....
58	2-5-2-6 نیروگاه بزرگ PV جهان.....
59	2-5-3 نیروگاههای کلکتور خورشیدی <sup>[1]</sup> .....
59	2-5-3-1 غیرمتمرکز کنند های توان خورشیدی.....
60	2-5-3-2 نیروگاههای خورشیدی با متمرکزکننده.....
60	2-5-3-3 ناودان های سهموی گون.....
65	2-5-3-4 دیش استرلینگ.....
67	2-5-3-4 بازتاب دهنده های فرسئل.....
68	2-5-3-5 نیروگاههای برج خورشیدی.....
71	2-5-3-6 نیروگاه خورشیدی با متمرکز کننده ی انکساری <sup>[1]</sup> .....
71	2-5-3-7 نیروگاه خورشیدی با گیرنده مسطح.....
72	2-5-3-8 نیروگاه خورشیدی با دریافت کننده های مرکزی <sup>[1]</sup> .....
73	2-5-4 دودکش خورشیدی.....
75	2-6 انباشت و ذخیره ی انرژی.....
79	2-7 نیروگاههای خورشیدی هیبرید (دو گانه ).....
80	2-8 مقایسه نیروگاههای حرارتی خورشیدی موجود.....
85	سلول های فتوولتاییک و نیروگاههای PV.....

85.....	1-3 مقدمه
85.....	2-3 سیستم های PV
85.....	واحدهای PV ، شارژ کنترلرها، مایکرو ها و باتری ها <sup>[6]</sup>
85.....	1-2-3 مقدمه
86.....	2-2-3 واحدهای PV
86.....	3-2-3 واحدهای کریستالی سیلیکون PV <sup>[4]</sup>
87.....	4-2-3 واحدهای غیر بلوری سیلیکونی (A-Si) <sup>[4]</sup>
88.....	5-2-3 واحدهای PV ساخته شده از دی سلناید مس-اینیدیوم (CIS) <sup>[4]</sup>
89.....	6-2-3 واحدهای PV ساخته شده از کادمیم تلوراید (CdTe)
89.....	7-2-3 ساختار کریستالی Si و ترازهای باند انرژی <sup>[2]</sup>
93.....	3-3 واحدهای PV <sup>[4]</sup>
95.....	1-3-3 آرایه های PV <sup>[4]</sup>
96.....	4-3 شارژ کنترلرها <sup>[6]</sup>
96.....	1-4-3 رگولاتور شانت
97.....	2-4-3 رگولاتور سری
98.....	3-4-3 رگولاتور PWM
99.....	4-4-3 رگولاتور MPPT
100.....	5-4-3 دنبال کننده های خورشیدی <sup>[5]</sup>
101.....	5-3 طراحی با نرم افزار Sunny Design
101.....	1-5-3 پارامترهای ورودی
108.....	خلاصه و نتیجه گیری
	<b>Error! Bookmark not defined.</b> منابع و مآخذ

## فصل اول

### انرژی های نو

#### 1-1 مقدمه

زندگی انسان ها در جهان متکی بر استفاده از انرژی است. این نیاز به انرژی به طور نمایی در حال رشد است سرعت این رشد در چند دهه اخیر، به میزانی رسیده است که سرعت مصرف منابع انرژی در زمین از سرعت بازسازی و جانشین شدن آنها بارها بیشتر است.

با توجه به پیشرفت های روز تکنولوژی و صنعت در جهان بسیاری از کشورها به یک شیب شدید در افزایش استفاده از سوخت های فسیلی رسیده اند و مصرف سوخت های فسیلی خود را به مقدار زیادی افزایش دادند. این امر نتایج منفی زیادی به همراه دارد. مثل تغییرات آب و هوایی، آلودگی طبیعت، کاهش ذخایر منابع طبیعی و بروز اختلافات سیاسی بین کشورها.

اکنون وضعیت کره زمین به درجه بحرانی خود رسیده است. به همین دلیل بسیاری از کشورها نسبت به مسائل مرتبط با رفع این بحران ها مثل صرفه جویی در مصرف انرژی، تغییرات جوی، سرمایه گذاری در انرژی های تجدیدپذیر، و عدم وابستگی به سوخت های فسیلی توجه بسیاری نشان می دهند. این توجهات باعث شده تا برخی کشورها روی میزان تولید دی اکسیدکربن محدودیت وضع کنند ( با قراردادهای پروتکل هایی مثل «کیوتو» که با قصد کاهش اثرات کشورهای صنعتی در تغییرات جوی و منابع طبیعی وضع شده است). به موازات این قوانین سرمایه گذاری برای افزایش بازدهی انرژی های غیر فسیلی و استفاده از سیستم های انرژی تجدیدپذیر در همه جای دنیا در حال انجام است.

همان طور که پیشتر ذکر شد مصرف سالانه انرژی به طور نمایی افزایش می یابد. این واقعیت نیز وجود دارد که ذخایر سوخت های فسیلی رو به اتمام است. از این رو بسیاری از کشورها به تحقیقات و سرمایه گذاری بر انرژی های تجدیدپذیر روی آورده اند. به عنوان مثال کشور سوئد 60% از نیاز انرژی الکتریکی خود را از منابع تجدیدپذیر تأمین می کند.

#### 1-1-1 هدف پروژه

در ابتدا با طرح و بسط موضوع انرژی و به ویژه انرژی های نو و میزان اهمیت این بخش از دانش و فناوری، تاریخچه ای از حوزه ی انرژی و به طور خاص انرژی الکتریکی و شیوه های تولید آن

بیان میشود. فرایند و عملکرد تبدیل انواع انرژی به انرژی الکتریکی مورد بررسی قرار می گیرد. این انرژی ها شامل انرژی جنبشی باد، انرژی گرمایی زمین گرمایی، انرژی جنبشی ناشی از جزر و مد اقیانوس ها، انرژی جنبشی حاصل حرکت رودخانه ها یا سقوط آب پشت سدها و در نهایت انرژی خورشیدی مورد بررسی قرار می گیرد. سپس شرح مختصری از مکانیزم عملکرد نمونه های اجرا شده ی این نوع نیروگاه ها ارائه خواهد شد. در ادامه با تمرکز دقیق تر بر روی انواع روش های تبدیل انرژی خورشیدی، به تولید برق خورشیدی از طریق سلول های فتوولتاییک میپردازیم. در فصل دوم اجزای مختلف یک نیروگاه خورشیدی شرح داده میشود و ساختار داخلی، مدارهای معادل الکتریکی و نحوه ی عملکرد هر کدام توضیح داده میشود تا در فصل سوم به طراحی نیروگاه خورشیدی فتوولتاییک مورد نظر برای این پروژه برسیم.

هدف از انجام پروژه طراحی اولیه ی اجزای یک نیروگاه خورشیدی است با توان ماکزیمم خروجی 300 کیلووات میباشد. ابتدا نوع کابل ها تعیین شده و سپس مقدار کابل مورد نیاز تخمین زده شده است ضمناً تعداد پنل های خورشیدی، نوع چینش و اتصال آن ها، تعداد و نوع اینورتر مورد استفاده نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. از این محاسبات میتوان برای محاسبه ی هزینه تقریبی نیروگاه و بهینه سازی اقتصادی آن استفاده نمود که البته در چارچوب کار این پایان نامه نیست.

## 1-2 انرژی در گذر زمان<sup>[8]</sup>

در فیزیک انرژی کمیتی است که آن را به هر ذره یا به مجموعه ای از ذرات آن ماده می توان نسبت داد. در سال 1857 توماس یانگ اولین کسی بود که از اصطلاح انرژی استفاده کرد. در سال 1829 گوستاوگ سپارد اصطلاح انرژی جنبشی را در معنای امروزی آن به کاربرد و در سال 1853 ویلیام رنکین به انرژی پتانسیل اشاره کرد. انواع مختلف انرژی عبارت از جنبشی، پتانسیل، گرمایی، جاذبه، صدا، کشش، نور و الکترومغناطیس می باشد.

فیزیکدان آلمانی Hermann von Helmholtz اثبات کرد که مبنای همه اشکال انرژی یکسان می باشد و از بین نمیرود بلکه از شکلی به شکل دیگر در می آید. انرژی یک کمیت اسکالر است.

سال	اختراع
600 سال قبل از میلاد	تالس <sup>1</sup> کشف کرد که در صورتی که کهربا به کتان مالیده شود میتواند اشیا را به خود جذب کند. وی در واقع الکتریسته ی ساکن را کشف کرد.
1600	ویلیام گیلبرت <sup>2</sup> انگلیسی برای اولین بار کلمه ی الکتریسته را که برگرفته از الکترون - کلمه ی یونانی ترجمه ی کهربا- بود استفاده کرد. او همچنین اولین کسی بود که از کلمات نیروی الکتریکی و میدان مغناطیسی و جاذبه الکتریکی استفاده کرد.
60-1650	اوتو ون گریک <sup>3</sup> - فیزیکدان آلمانی- یک فضای خلأ ساخت و با استفاده از آن توانست الکتریسته ی ساکن تولید کند.
46-1745	جورج ون کلایست <sup>4</sup> - فیزیکدان آلمانی- اولین خازن الکتریکی را ساخت.
1800	الکساندر ولتا <sup>5</sup> ی ایتالیایی اولین باتری الکتریکی را ساخت.
1808	هامفری دیوی <sup>6</sup> انگلیسی اولین لامپ موثر را اختراع کرد. حباب لامپ از یک تکه کربن ساخته شده بود که هنگام اتصال به باتری از طریق سیم های برق میدرخشید.
1821	مایکل فارادی <sup>7</sup> انگلیسی اصول کارکرد چرخش الکترومغناطیسی را کشف کرد که بعد ها کلید توسعه موتور های الکتریکی شد.
1837	توماس داونپورت <sup>8</sup> آمریکایی موتور الکتریکی را اختراع کرد.

Thales<sup>1</sup>  
William Gilbert<sup>2</sup>  
Otto Von Guericke<sup>3</sup>  
George Von Kleist<sup>4</sup>  
Alessandro Volta<sup>5</sup>  
Humphry Davy<sup>6</sup>  
Michael Faraday<sup>7</sup>  
Thomas Davenport<sup>8</sup>



1839	ویلیام رابرت گرو <sup>1</sup> اسکاتلندی اولین سلول سوختی را اختراع کرد. وسیله ای که با ترکیب هیدروژن و اکسیژن انرژی تولید میکند.
1876	چارلز براش <sup>2</sup> آمریکایی اولین ژنراتور را اختراع کرد که میتواند برق با جریان مستقیم تولید کند.
1878	چارلز براش لامپ قوسی اختراع کرد که توسط ژنراتور تغذیه می شد.. توماس ادیسون <sup>3</sup> آمریکایی شرکت خود را در نیویورک تأسیس کرد. او تعدادی از اختراعات ثبت شده مربوط به روشنایی الکتریکی را خرید و سپس آزمایش هایی را برای تولید یک لامپ با طول عمر بالا شروع کرد.
1886	ویلیام استنلی <sup>4</sup> آمریکایی با استفاده از ترانسفورمر برای تبدیل ولتاژ یک سیستم برق رسانی جریان متناوب احداث نمود.
96-1895	نیروگاه آبی آبشار نیاگارا افتتاح شد. در ابتدا برق را برای مصارف محلی تامین میکرد. یک سال بعد از آن با احداث یک خط جریان متناوب برق تولیدی این آبشار به بوفالوی نیویورک در فاصله ی 20 مایلی انتقال داده شد.
1897	جوزف تامسون <sup>5</sup> انگلیسی الکترون را کشف کرد.
1921	لیک ساید <sup>6</sup> اولین نیروگاه جهان که با سوخت زغال سنگ پودر شده کار میکرد در ایالت ویسکونین آمریکا نصب شد.
46-1943	اولین کامپیوتر دیجیتال همه منظوره ساخته شد: ENIAC <sup>7</sup>
1954	اولین نیروگاه هسته ای در روسیه انرژی خود را به شبکه تحویل داد.
	چاپلین <sup>8</sup> ، فولر <sup>9</sup> و پیرسون <sup>10</sup> در آمریکا در آزمایشگاه بل اولین سلول خورشیدی را اختراع کردند.

William Robert Grove<sup>1</sup>

Charles Brush<sup>2</sup>

Thomas Edison<sup>3</sup>

William Stanley<sup>4</sup>

Joseph John Thomson<sup>5</sup>

Lakeside power plant<sup>6</sup>

Electronic Numerical Integrator and Computer<sup>7</sup>

chaplin<sup>8</sup>

Fuller<sup>9</sup>

Pearson<sup>10</sup>

### 1-3 تولید انرژی آبی (Hydropower)<sup>[7]</sup>

بخش اصلی یک نیروگاه آبی رودخانه ها یا انبارهای عظیم ذخیره ی آب است. معمولاً نیروگاه های برق آبی را بر حسب ظرفیت به سه دسته نیروگاه های برق آبی میکرو<sup>1</sup>-توان های کمتر از 100 KW - نیروگاه های برق آبی مینی<sup>2</sup>-توان های کمتر از 5MW - و نیروگاه های برق آبی کوچک تقسیم بندی می کنند.

#### 1-3-1 تعریف

انرژی آبی (Hydropower) همان برق تولید شده با استفاده از انرژی آب جاری است؛ که اغلب در ابعاد بزرگ تولید می شود. این نوع انرژی آلودگی به همراه ندارد ولی می تواند در زندگی آبریان و دیگر جانورانی که زندگی آن ها مرتبط با آب رود است خلل وارد کند.

#### 1-3-2 نیروگاههای آبی

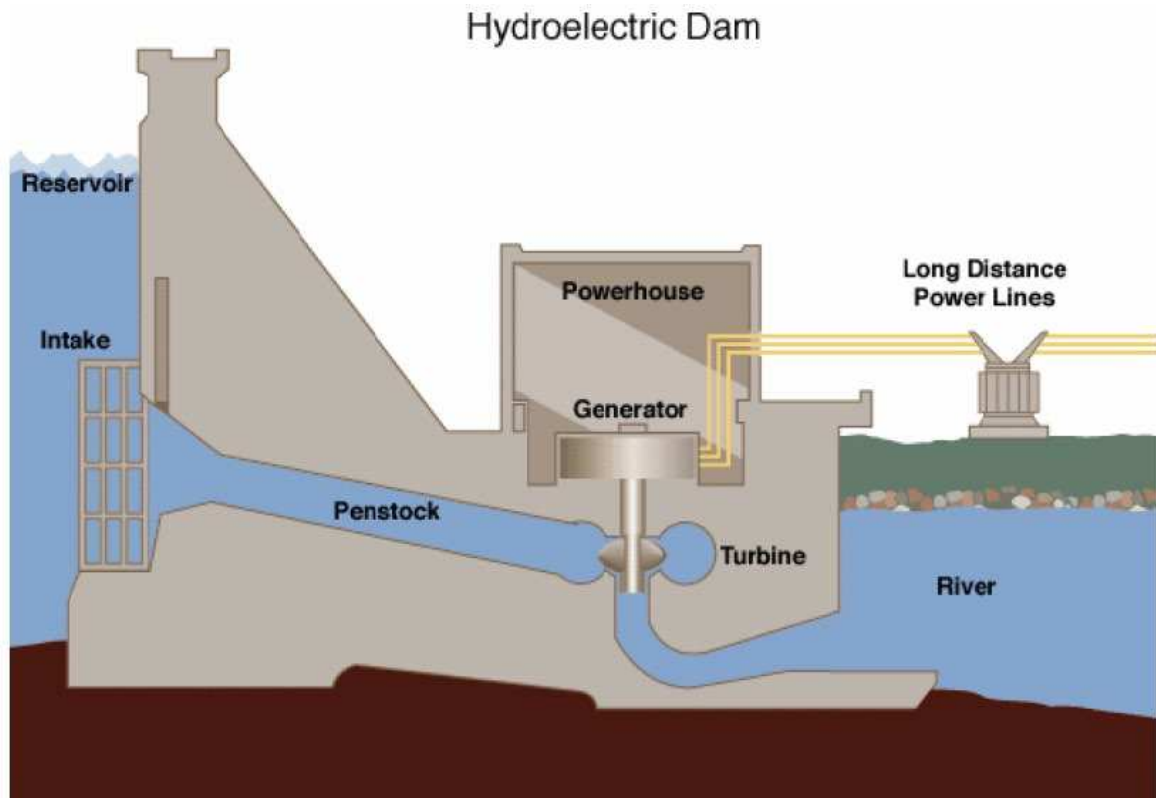
این نوع نیروگاهها به چرخه ی آب وابسته هستند. در چرخه ی آب ابتدا نور خورشید سطح آب را گرم می کند و باعث تبخیر آب می شود. این بخار به شکل ابر و سپس باران و برف بر زمین فرو می ریزد. این آب به صورت رود و چشمه به دریا باز می گردد و چرخه کامل می شود.

در شکل زیر نحوه ی کار یک نیروگاه آبی را می بینیم . آب پشت سد از طریق مجرای penstocks به سمت توربین ها هدایت می شود، و توربین ها را چرخانده و برق تولید می کند. آب سپس به سمت پایین رودخانه هدایت می شود.

---

<sup>1</sup> Micro Hydropower plant

<sup>2</sup> Mini Hydropower plant



شکل 1-1- نیروگاه آبی

میزان تولید برق به اختلاف ارتفاع میان دو بخش تقسیم شده ی رودخانه توسط سد وابسته است. معادله (1-1) برای یک سطح مقطع خاص و موقعیت مکانی مشخص، همواره برقرار است.

$$\frac{v^2}{2g} + h + \frac{p}{\rho g} = \frac{P}{\rho g Q} \quad (1-)$$

که در آن  $v$  سرعت جریان آب است.  $g$  شتاب گرانش زمین است و  $h$  ارتفاع آب است.  $p$  فشار ورودی آب است.  $\rho$  چگالی آب مساوی  $1000.00 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$  است.  $P$  توان خروجی توربین و واحد آن  $\left(\text{Kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$  میباشد. و  $Q$  شار جریان آب است و واحد آن  $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$  است. جریان دبی آب برابر است با:

$$Q = Av \quad (2-)$$

میزان توان تولید شده با سرعت جریان یا افزایش ارتفاع آب متناسب است. در نیروگاه های برق آبی کوچک برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی از ژنراتور القایی (آسنکرون)<sup>1</sup> و ژنراتور سنکرون<sup>2</sup> استفاده می شود. غالباً ملاحظات اقتصادی در تعیین نوع ژنراتور نقش اساسی دارد. مهم ترین مزیت ژنراتورهای سنکرون این است که با کنترل مقدار جریان تحریک می توانند به صورت پیش فاز یا پس فاز کار کنند. مزیت اساسی دیگر ژنراتورهای سنکرون، که موجب انتخاب آن در نیروگاه برق آبی میشوند، این است که میتوانند در حالت جدا از شبکه نیز ولتاژ و فرکانس کاری خود را کنترل کنند. دلیل اصلی استفاده از ژنراتور های آسنکرون (القایی) در نیروگاه های برق آبی کوچک، هزینه ی سرمایه گذاری اندک آنهاست. این نوع از ژنراتور ها به سیستم کنترلی پیچیده یا تجهیزات حفاظتی گران قیمت نیاز ندارند. تنها وسیله ی ابزار دقیق مورد نیاز یک آمپر متر است تا مقدار بار را اندازه گیری کند. مقادیر ولتاژ و فرکانس از طرف شبکه به ژنراتور تحمیل می شوند.

بزرگترین نیروگاه آبی جهان، سد جرج است. سطح آبی که برای این سد در نظر گرفته شده است حدود  $1045 \text{ km}^2$  است. این نیروگاه 32 توربین و ظرفیت نصب  $22500 \text{ MW}$  را دارد و تخمین عمر کارکرد آن  $100000 \text{ GWh}$  می باشد.



شکل 1-2- نیروگاه آبی تری جورجس - چین

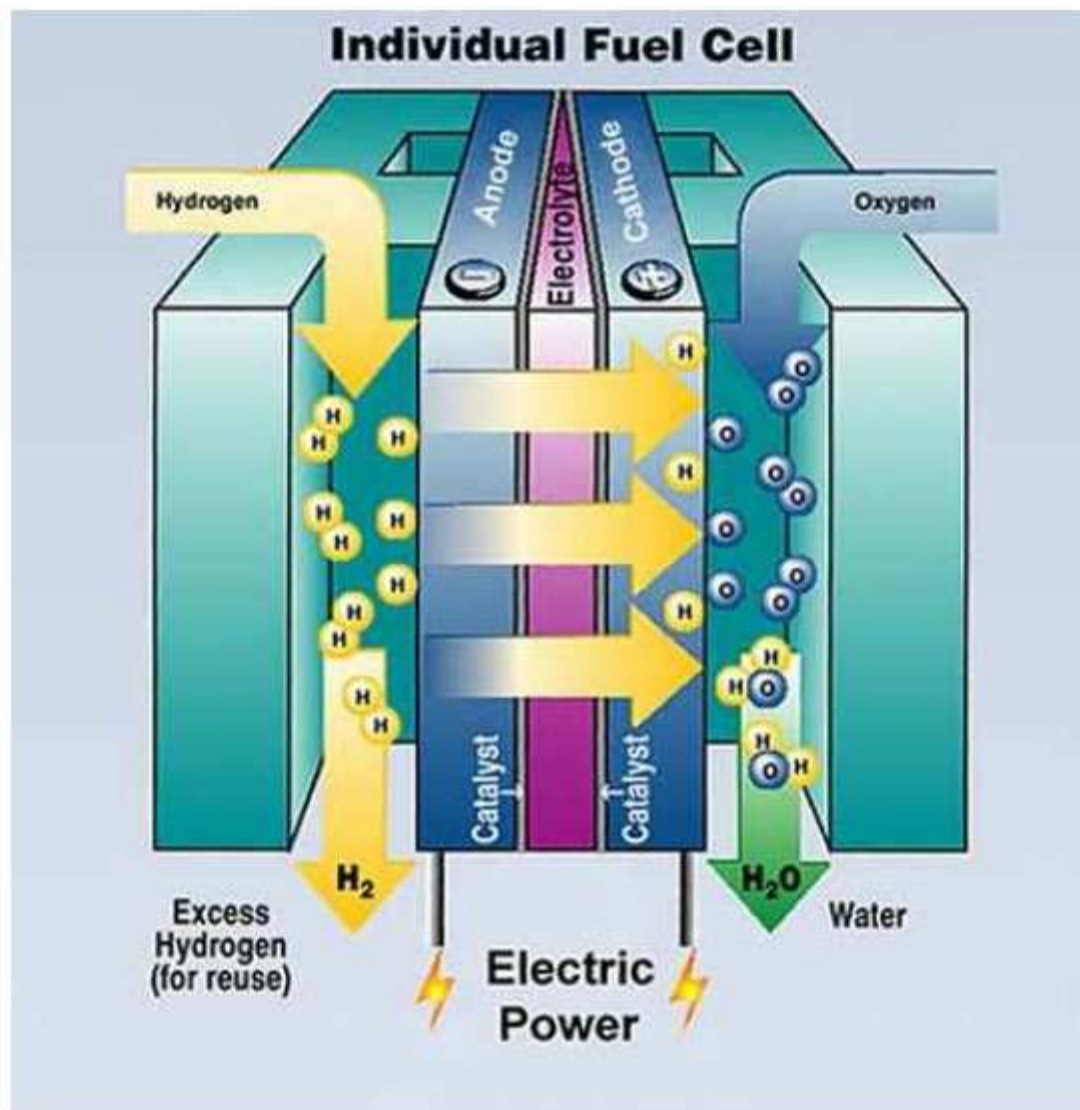
<sup>1</sup> Inductive generators  
<sup>2</sup> Synchronous generators

آب جمع شده در پشت سد در مناطق گرمسیری می تواند مقدار قابل توجهی گاز متان و دی اکسید کربن تولید کند. این گاز ها در اثر پوسیدگی قسمت های مختلف گیاهان و زباله هایی به وجود می آیند که از بالای رودخانه آمده اند و در محل سد جمع شده اند و به وسیله ی باکتری های غیر هوازی تجزیه می شوند. بیشتر گاز تولیدی در اثر پوسیدگی را گاز متان تشکیل می دهد که از نظر اثر گلخانه ای از دی اکسید کربن خطرناک تر است.

#### 1-4 سوخت های هیدروژنی<sup>[12]</sup>

هیدروژن گازی بی رنگ و بی بو است که از سوختن آن بخار آب حاصل می شود که به سرعت توسط محیط اطراف جذب می شود. یک کیلوگرم از هیدروژن تقریباً سه برابر همین میزان بنزین، انرژی آزاد می کند. امروزه استفاده از گاز هیدروژن در موتورهای احتراقی و وسایل نقلیه الکتریکی باتری دار مورد بررسی قرار گرفته است. هیدروژن در دما و فشار طبیعی، یک گاز است و به این علت، انتقال و ذخیره آن از سوخت های مایع، دشوارتر است. سامانه های مورد استفاده برای ذخیره هیدروژن توسعه یافته اند. به طور مثال می توان از سامانه های تولید هیدروژن فشرده و هیدروژن مایع نام برد.

سوخت هیدروژن به عنوان منبعی تجدیدپذیر، که پاک تر و فراوان تر از سوخت های فسیلی نیز می باشد، می تواند کاربرد زیادی برای نیروگاه ها و بخش حمل و نقل داشته باشد. مهم ترین تفاوت بین موتور احتراق داخلی بنزین سوز و هیدروژنی در ماهیت این دو سوخت است. هیدروژن تحت فشار هوای طبیعی سریع تر از سوخت معمولی مشتعل می شود، اما دمای احتراق آن اندکی کمتر از بنزین است. در داخل موتور، سرعت بالای احتراق مخلوط هیدروژن و هوا دمای بیشتری در مقایسه با یک موتور بنزینی تولید می کند. یکی از مزایای قابل توجه فشار بالاتر احتراق از مخلوط هیدروژن و هوا، تولید توان بیشتر از موتور بنزینی است و این امر نشان می دهد که موتور هیدروژنی بازده و کارایی بیشتری دارد.



شکل 1-3- سلول سوختی هیدروژنی

#### 5-1 جزرومد

جزرومد توسط نیروی گرانش ماه و خورشید و چرخش زمین حاصل می شود. نزدیک ساحل، ارتفاع سطح آب تا حدود 12/5 متر می تواند جابجا شود. انرژی جزرومد بسیار بیشتر از انرژی خورشید یا انرژی باد قابل پیش بینی است. حداقل جابجایی سطح آب برای آنکه تولید صرفه ی اقتصادی داشته باشد 7 متر است.

به دو شیوه می توان از این انرژی بهره جست:

- 1- با مهارکردن جریان های جزرومدی کنارساحل.
- 2- با ساختن دیواره های نیمه نفوذپذیر بر سر راه مدخل رودخانه ها به دریا، البته رودخانه هایی که بازه ی جزرومدی بالا دارند.

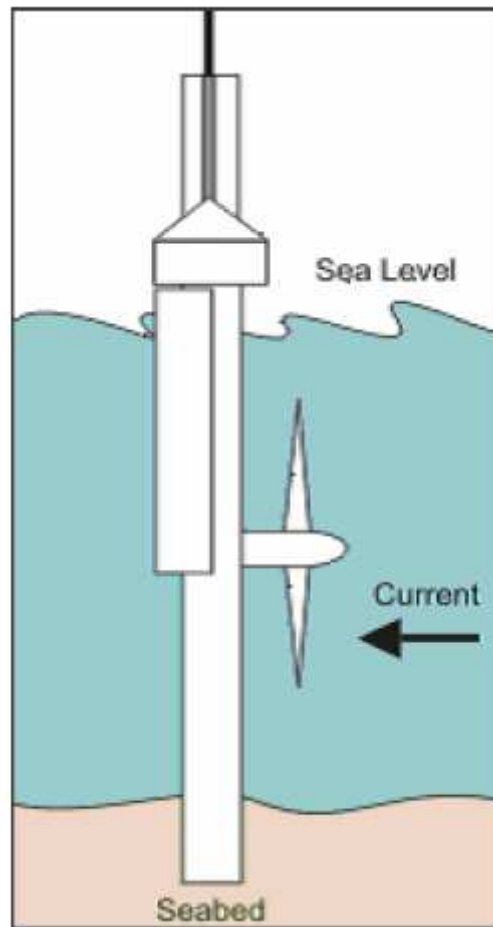


شکل 1-4 - سد جزرومدی - رودخانه رانس - فرانسه

یک سیستم تولید الکتریسته ی جزر و مدی ساده، تشکیل شده است از یک سد که در مدخل ورود رودخانه به دریا ساخته می شود. هنگامی که مد اتفاق می افتد و سطح آب بالا می آید دریچه های سد باز می شوند و هنگام جزر که سطح آب پایین است دریچه ها بسته می شوند.

فنس<sup>1</sup> های جزر و مدی روش دیگر مهار نیروی جزر و مد دریاها و اقیانوس هاست. تمام آبی که از این فنس ها عبور می کند از توربین می گذرد. کانال های آبی ایجاد شده بین دو جزیره یا دو قطعه خشکی که میان آن ها آب دریا عبور میکند بهترین گزینه برای ساخت این نوع از نیروگاه های جزر و مدی است. حصارهای جزر و مدی از انواع دیگر نیروگاه های آبی ارزان تر است و تأثیرات زیست محیطی کمتری نیز دارد؛ هرچند مسیر حرکت جانوران آبی را عوض می کند. در شکل (1-5) شماتیک این نوع از نیروگاه های آبی نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Fense



شکل 1-5- شماتیک یک نیروگاه جزر و مدی

اولین قدم در ساخت نیروگاه جزر و مدی ساخت سد یا مانع مصنوعی<sup>1</sup> بر مدخل رودخانه به دریاست. ساخت سد یک فرآیند پرهزینه است و این خود باعث افزایش هزینه نصب و افزایش قیمت برق تولید شده خواهد شد. بهترین مکان برای ساخت ایستگاه های جزرومدی جایی است که مدخل رودخانه به دریا باریک تر باشد، چرا که باعث کاهش عرض سد می شود. سپس در نقاط مشخص در طول سد دریچه ها و توربین ها نصب می شوند. توربین های استفاده شده در این نوع نیروگاه ها از لحاظ شکل و ساختار بسیار به توربین های بادی شبیه هستند و در واقع معادل آنها در آب به شمار می روند. با این حال از آنجا که چگالی آب 800 بار از هوا بیشتر است، توربین های آبی باید قوی تر و محکم تر طراحی و ساخته شوند. توربین های آبی برای مهار نیروی جزر و مد بارها سنگین تر - و البته گران تر - از توربین های بادی هستند ولی انرژی بیشتری جذب می کنند. یکی از معایب این روش - علاوه بر هزینه نصب و راه اندازی بالا به دلیل گران بودن توربین های آن - ضریب ظرفیت پایین در تبدیل انرژی

<sup>1</sup> Barrage



جنبشی امواج به انرژی الکتریکی است ( حدود 20 تا 35 %) و در عین حال چون 12/5 ساعت طول چرخه جزر و مد است، در باقی ساعات شبانه روز نیروگاه توان به شبکه تحویل نمی دهد و خارج از خط خواهد بود.

مجموعه ی توان بالقوه ی اقیانوس ها در جهان که قابل تبدیل با مکانیزم جزر و مد باشد، حدود  $64000 \text{ MW}$  است. مقدار برق تولید شده در ساعات مختلف روز در این نوع نیروگاهها متفاوت است این مقدار به هرحال هماهنگ با زمان نیاز به آن نیست. از طرفی چون تولید آن متناسب با حرکت ماه و خورشید است، قابلیت اعتماد بالایی دارد و میتواند به عنوان یک منبع تولید توان در شبکه به کار رود. علاوه بر این مزیت، این نیروگاه میتواند یک جایگزین برای نیروگاههای سوخت فسیلی به شمار رود و آلودگی های زیست محیطی را کاهش دهد.

امروزه، هرچند این انرژی با پیشرفت تکنولوژی قابل تبدیل به انرژی الکتریکی است ولی هنوز برق تولید شده توسط این روش بسیار گران است؛ و به همین دلیل از این نوع نیروگاه ها در جهان تنها یک ایستگاه فعال وجود دارد که بر روی رودخانه ی لارانس در شمال فرانسه نصب شده و حدود  $240 \text{ MW}$  برق تولید می کند. این نیروگاه از سال 1966 برق تولید می کند. از این نوع نیروگاه یک نمونه با توان  $20 \text{ MW}$  در آنپولیس نصب و تحت آزمایش می باشد و یک نیروگاه با توان  $0.4 \text{ MW}$  در مارماسنگ روسیه وجود دارد. مطالعات در انگلستان نشان می دهد یک سد جزرومدی بر روی رود "سون" در غرب این کشور می تواند تا  $12 \text{ GW}$  توان به شبکه تحویل بدهد که معادل 10% برق مصرفی این کشور می باشد.

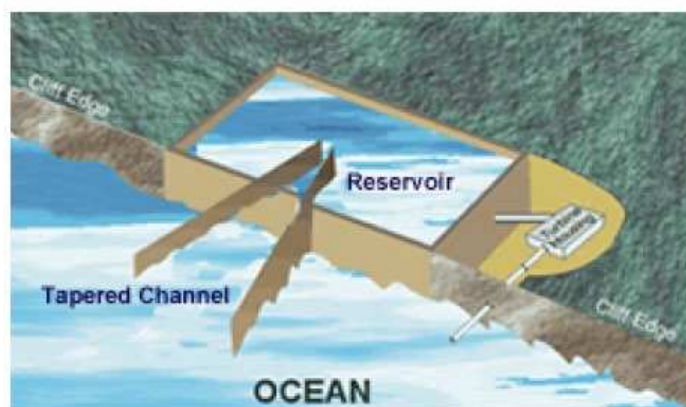
#### 1-6 انرژی امواج<sup>[12]</sup>

امواج در اثر وزش باد بر سطح دریا و اقیانوس تولید می شوند و انرژی پتانسیل زیادی دارند. برای مثال انرژی قابل تبدیل امواج اقیانوس به انرژی الکتریکی در آمریکا سالانه حدود 252 بلیون کیلووات ساعت تخمین زده شده است؛ که حدود 7% مصرف برق آمریکا در سال 2008 می باشد. سواحل غربی آمریکا و نیز اروپا و سواحل ژاپن و نیوزیلند مکان های مناسبی برای مهار انرژی امواج به شمار می روند. انرژی باد به دو صورت انرژی پتانسیل و جنبشی در امواج دریا ذخیره می شود. انرژی پتانسیل امواج متناسب با اختلاف ارتفاع بین قله و دره ی موج می باشد. انرژی جنبشی آن نیز حاصل از حرکت جرم آب محصور بین دو صفحه ی عمود بر جهت انتشار موج است. انرژی امواج حاصل جمع انرژی جنبشی و پتانسیل آن است. توان قابل تبدیل امواج متناسب با مجذور دامنه ی آن هاست.<sup>[12]</sup>



شکل 1-6- نیروگاه امواج پلامیس - پرتغال

روش های مختلفی برای استفاده از امواج در تولید انرژی الکتریکی وجود دارد. در یک روش امواج به سمت یک کانال باریک هدایت می شوند تا توربین بتواند بیشتری جذب کند. امواج سپس وارد انباره ای به نام «باسین<sup>1</sup>» می شوند و در مسیر حرکت خود توربین را به گردش در می آورند. نمایی از این سیستم در شکل 1-7 آمده است.



شکل 1-7- تکنولوژی کانال های امواج<sup>[19]</sup>

به طور کلی دو روش برای تبدیل انرژی امواج موجود است:

- 1- در یک روش تجهیزات نیروگاه به طور شناور روی آب دریا قرار می گیرند. به این روش سیستم های فعال واقع بر سطح دریا گفته می شود.

<sup>1</sup> Basin

2- در روش دیگر تجهیزات نیروگاه در مناطق ساحلی دریا نصب می شوند و بر خلاف روش ارائه شده در بند قبل بر سطح آب شناور نیستند. این روش تولید آبی غیر فعال ساحلی نامیده می شود.

اولین نیروگاه تجاری تولید برق از انرژی امواج در سال 2008 در پرتقال ساخته شد.



شکل 1-8- جاذب انرژی امواج

#### 1-7 تبدیل انرژی گرمای اقیانوسها (OTEC) [7]

درصد زیادی از انرژی تابشی خورشید به صورت انرژی گرمایی در اقیانوس ها ذخیره شده است. در مناطقی خاص مثل مناطق استوایی دمای سطح آب خیلی بالاتر از دمای کف آب است. این اختلاف دما مبنای عملکرد نیروگاه های تبدیل انرژی گرمایی اقیانوس هاست. سیستم های تبدیل انرژی گرمایی اقیانوس ها باید اختلاف دمای حدود 20 درجه برای عملکرد خود داشته باشند. امروزه تحقیقات و آزمایش ها در سطح گسترده بر روی این نوع از سیستم های تبدیل انرژی انجام نمی شود، زیرا این نوع نیروگاه ها با مشکلات و معایب زیادی مواجه هستند. مهمترین این مشکلات بازده بسیار پایین این سیستم هاست. پمپ کردن آب در اقیانوس برای ایجاد چرخه نیروگاه نیز دومین مسأله ی مهندسی این نوع نیروگاه هاست. حتی پس از تولید برق در این نوع نیروگاه ها، انرژی الکتریکی تولید شده باید به ساحل منتقل شود که با در نظر گرفتن مسیر طولانی و تلفات بالا و نیز مشکلات نصب خطوط انتقال، هزینه ی برق تولید شده بسیار بالا خواهد بود.



شکل 1-9- نیروگاه OTEC در هاوایی [20]

با این حال، تا هنگامی که اختلاف دمای سطح و عمق آب اقیانوس 20 درجه باشد، این نوع سیستم ها میتوانند مقدار قابل توجهی برق تولید کنند. به همین دلیل اقیانوس ها میتوانند منبع قابل توجهی برای تولید انرژی تجدید پذیر به شمار بروند. مقدار توان قابل تبدیل بالقوه ی آنها حدود  $10^{13}$  وات تخمین زده شده است. ولی با توجه به مسائل مطرح شده چندین دهه طول خواهد کشید تا تولید و انتقال این انرژی صرفه اقتصادی داشته باشد.

#### 1-7-1 انواع سیستم های تبدیل انرژی گرمای اقیانوسها OTEC

- 1- چرخه ی باز
- 2- چرخه ی بسته
- 3- چرخه هایبرد<sup>1</sup>

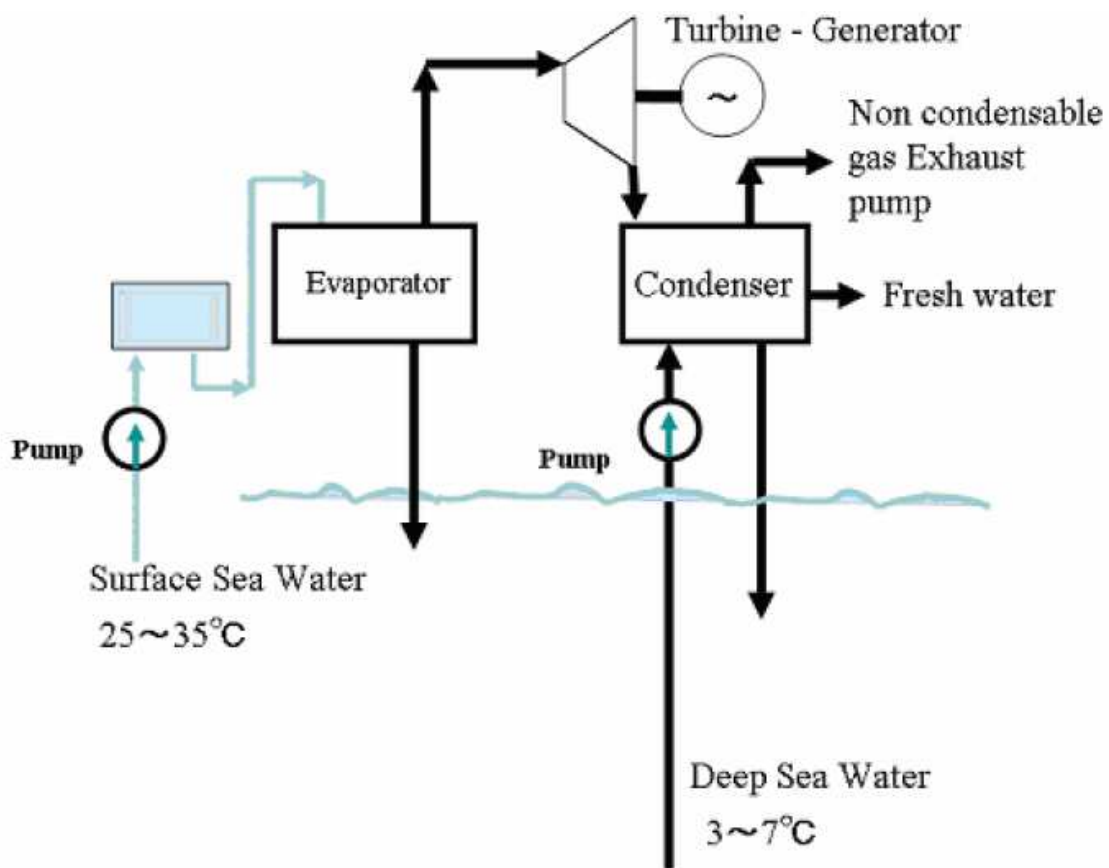
مهمترین بخش در هر سه نوع چرخه، آب سرد دریاست. در هر سه سیستم آب سرد باید به سطح دریا آورده شود؛ و این نیازمند پمپ کردن آب از اعماق اقیانوس به سطح آن است. البته در روشی

<sup>1</sup> Hybrid Cycle

دیگر علاوه بر سه چرخه‌ی فوق، آب دریا نزدیکی کف آن نمک‌زدایی می‌شود تا چگالی آن کاهش یابد و سپس توسط لوله‌ای به سمت سطح آن هدایت می‌شود.

#### الف- چرخه باز

در یک سیستم چرخه باز، آب گرم دریا سیال کار در این سیستم است. آب گرم باعث تولید جریانی در فشار حدود 2.4 کیلو پاسکال می‌شود. جریان آب به سمت یک توربین فشار ضعیف فرستاده می‌شود که به یک ژنراتور وصل شده است تا برق تولید کند. این جریان آب سپس توسط یک لوله به عمق اقیانوس پمپ می‌گردد. دیاگرام این مراحل در شکل زیر آمده است.

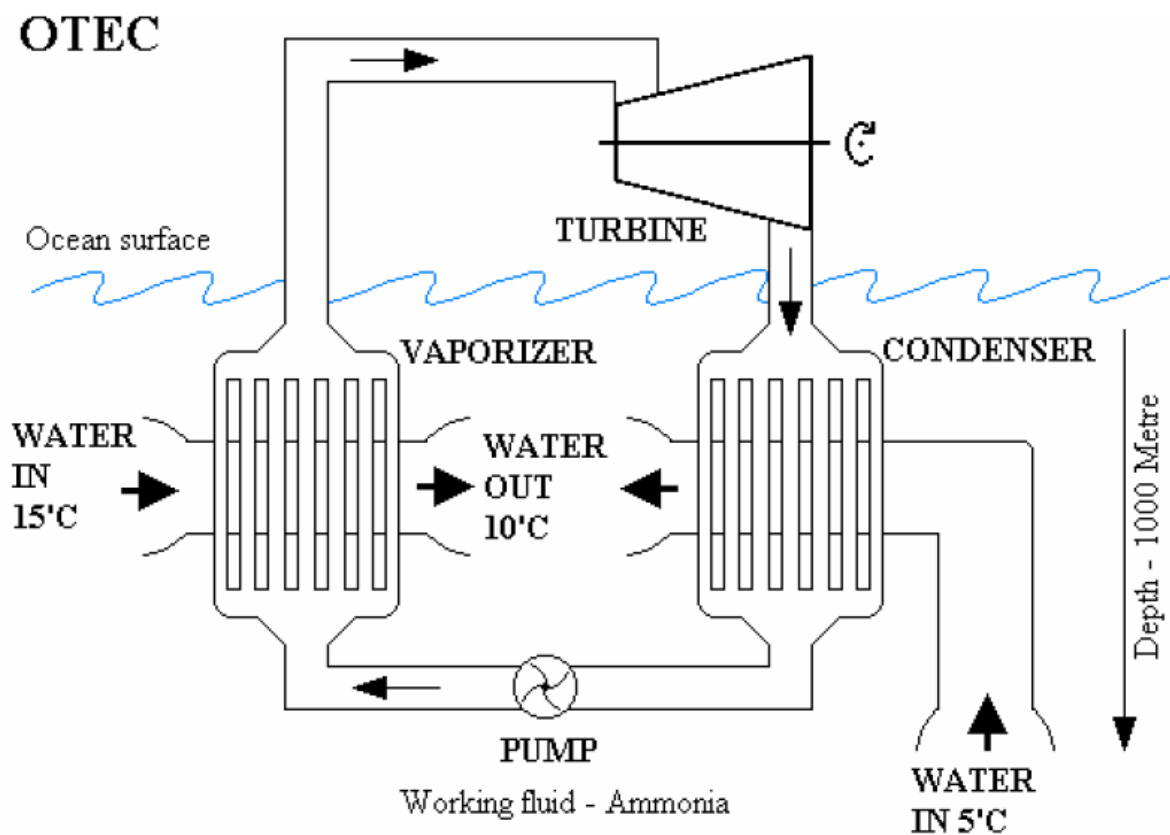


شکل 1-10- شماتیک یک سیستم چرخه باز تبدیل انرژی گرمای اقیانوس ها [21]

#### ب- چرخه بسته

در سیستم های چرخه بسته از سیالی با نقطه جوش پایین مثل آمونیاک، برای چرخاندن توربین و تولید توان استفاده می‌شود. حرارت آب گرم سطح دریا توسط یک مبادله کننده گرمایی به سیال سیستم انتقال داده می‌شود؛ سپس این سیال که نقطه جوش پایینی دارد، بخار می‌شود. بخار تحت فشار بالا توربین را در مسیر خود می‌چرخاند و سپس فشار آن کاهش یافته و به درون مخزنی در عمق اقیانوس پمپ می‌شود. آب سرد نقاط عمیق اقیانوس مثل سرد کننده عمل کرده و بخار را به

مایع تبدیل میکند تا سیال دوباره به چرخه برگردد. دیاگرام چرخه بسته در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل 1-11- شماتیک سیستم حلقه بسته سیستم تبدیل انرژی گرمایی اقیانوس ها [21]

#### ج- چرخه هایبیرید

در چرخه هایبیرید از هر دو تکنیک به کار رفته در چرخه بسته و چرخه باز استفاده می شود. در یک سیستم تبدیل انرژی از نوع چرخه ی هایبیرید، آب گرم سطح اقیانوس وارد یک محفظه - مبادله کننده حرارتی- میشود و سپس همانند مرحله ی تبخیر در چرخه باز، سیال سیستم -آمونیاک- را تبدیل به بخار میکند. آمونیاک بخار شده توربین را برای تولید برق می چرخاند. این بخار سپس در مبادله کننده گرما سرد میشود. در این مرحله آب با چگالی کمتر به دست می آید.

#### 1-7-2 خلاصه

انرژی موجود در آب جاری از زمان مصر باستان شناخته شده است، و در آستانه انقلاب صنعتی پس از رنسانس در اروپا از آن استفاده می شد. امروزه انرژی حاصل شده از حرکت توربین ها توسط آب جاری یکی از ارزانتترین شیوه های تولید برق است. حرکت جزر و مد ، انرژی جنبشی رودخانه ها، حرکت امواج و همچنین اختلاف دمای سطح و عمق اقیانوس منشأ ایجاد یک سیستم



تبدیل انرژی است. تولید برق از طریق انرژی موجود در آب جاری چندین مزیت دارد. اول آنکه آب یک منبع ارزان قیمت انرژی است. از طرفی عاری از آلودگی است. البته این روش تبدیل انرژی معایبی نیز دارد؛ مثل تأثیرات زیست محیطی بر روی جانوران و ماهیان در اثر ساختن سد بر روی رودخانه ها.

جدول 1- 1 لیست نیروگاههای موجی و جزر و مدی

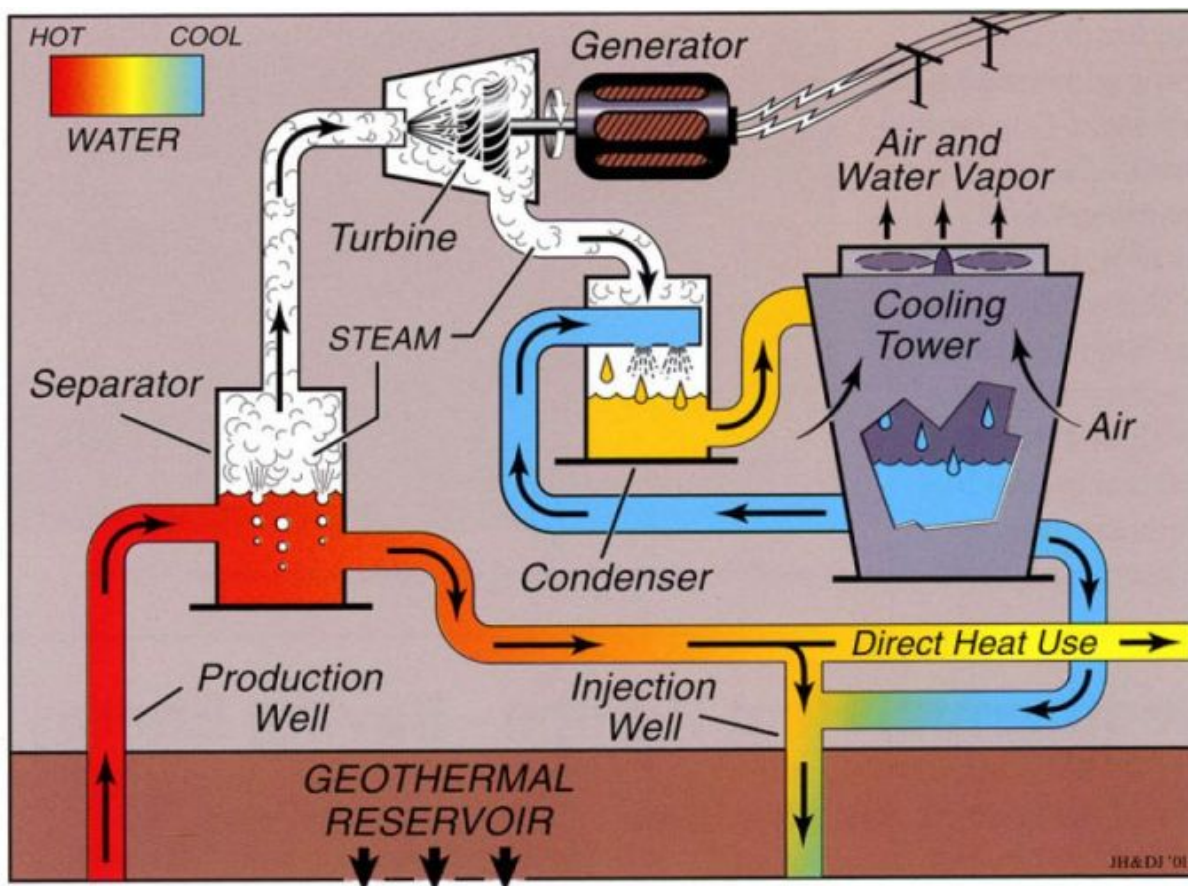
نام پروژه	نوع نیروگاه	مکان نصب	ظرفیت
Agucadora Wave Park	موجی	پوآ دوارزیم، پرتقال	2.25 MW
Fall of Warness	جزر و مدی	بریتانیا	250 kW
Islay Project	موجی	بریتانیا	500 kW
Jiangxia	جزر و مدی	چین	3.2 MW
Kislaya Bay	جزر و مدی	دریای بارنت، روسیه	200 kW
Port Kembla Wave	موجی	استرالیا	500 kW
Tite Project	جزر و مدی	رودخانه ی ایست، نیویورک	120 kW
Xingfuyang	جزر و مدی	چین	1.3 MW



شکل 1-12 - انرژی زمین گرمایی [22]

صفحات زمین به آرامی روی جرم سنگی بسیار داغی حرکت میکنند. این صفحات گاه از هم جدا شده، درون هم فرو میروند یا روی هم میلغزند. نمود این حرکت ها آتش فشان هایی است که با فوران خود میزان بالای انرژی ذخیره شده در درون زمین را نشان می دهد.





شکل 1-13- شماتیک فرایند بهره برداری از انرژی زمین گرمایی [23]

هسته ی زمین ترکیبی از مواد گداخته است. حرکت صفحات زمین منشا ایجاد چشمه های آب داغ، مجراهای بخار و گیزرها<sup>1</sup> می باشد. انرژی زمین گرمایی میتواند هم به طور مستقیم و هم غیر مستقیم مورد استفاده قرار بگیرد. انرژی زمین گرمایی قابلیت اطمینان بالایی دارد چون همواره در حال تولید است؛ این نوع سیستم تبدیل انرژی میتواند 95 % از ساعات شبانه روز توان تولید کند. نیروگاه های ساخته شده برای تبدیل انرژی زمین گرمایی نسبت به دیگر انواع نیروگاه ها کمتر نیاز به تعمیرات دارد؛ و نیز بیشترین ضریب بازده تولید توان را در بین انواع نیروگاه ها دارا هستند. از معایب این نوع نیروگاه ها میتوان به تاثیرات زیست محیطی به سبب حفر زمین و نیز مساحت وسیع زمین مورد نیاز برای احداث آن ها (بین 4 هزار تا 33 هزار متر مربع برای هر مگاوات) اشاره کرد.

<sup>1</sup> Geyser : چشمه هایی که گاه گاه آب داغ و بخار از خود منتشر میکنند.

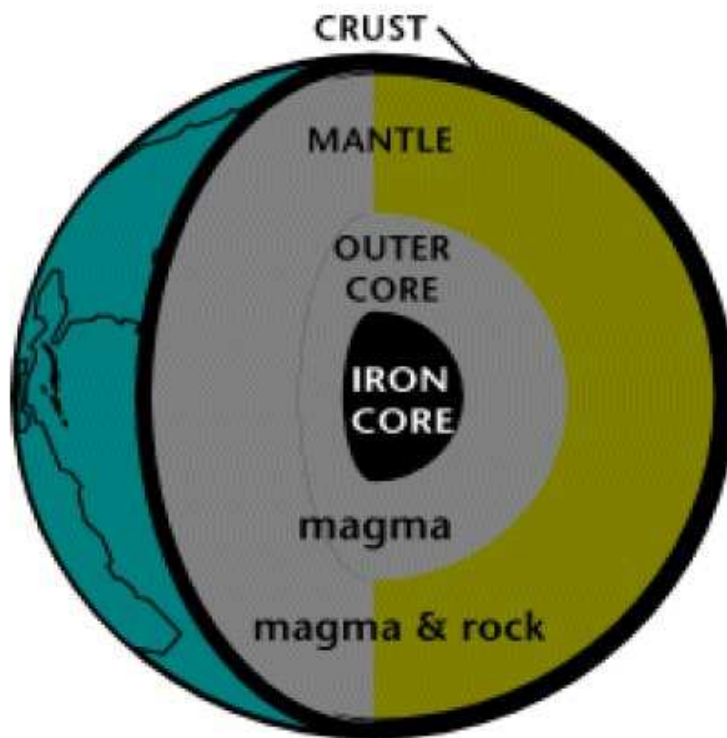
به ازای هر 100 متر حفر زمین به سمت مرکز آن، دمای سنگ ها 3 درجه افزایش می یابد. یعنی حدود 3 کیلومتر زیرزمین دمای سنگ ها از دمای جوش آب بیشتر است. در این عمق از زمین دمای آب می تواند حتی تا 150 درجه نیز بالا برود. این دما بالاتر از دمای جوش آب است ولی آب در این شرایط بخار نمی شود چون با هوا تماس ندارد.

#### 1-8-1 تعریف-انرژی زمین گرمایی (Geothermal Energy)

منبع انرژی زمین گرمایی، حرارت طبیعی زمین است که از مواد مذاب یا ماگما نشأت می گیرد. این انرژی در اثر تجزیه ی رادیواکتیو ایزوتروپ پتاسیم و عناصر دیگری که در پوسته ی زمین پراکنده اند و همچنین به خاطر فشار زیاد حاصل از نیروی وزن ایجاد می شود. به تجربه معلوم شده است که هر چه به عمق زمین افزوده شود، دما افزایش می یابد. تقریباً به ازای هر 100 متر عمق حدود 3 درجه به دمای زمین افزوده می شود. به طوری که درجه حرارت در لایه های پایینی پوسته زمین حدود 1300 درجه و در هسته ی مرکزی زمین حدود 5000 درجه است.<sup>[13]</sup>

#### 1-8-2 ساختار داخلی زمین

انرژی زمین گرمایی در عمق زمین تولید می شود. در شکل صفحه ی بعد ساختار زمین نشان داده شده است. ابتدا پوسته قرار دارد که از جنس ماگما و راک می باشد؛ سپس هسته ی بیرونی که از جنس ماگما است و بعد از آن هسته ی داخلی مرکزی که از آهن تشکیل شده است.



## THE EARTH'S INTERIOR

شکل 1-14 - ساختار داخلی زمین

گرمای درون هسته ی زمین به طور دائم توسط تجزیه ی ذرات رادیواکتیو تولید می شود. زمین لایه های مختلفی دارد:

1- هسته که خود دو لایه دارد؛ هسته مرکزی از جنس آهن جامد و لایه بیرونی تر از سنگ مذاب به نام ماگما.

2- گوشته که حدود 290 کیلومتر قطر دارد و از ماگما و سنگ تشکیل شده است.

3- پوسته که بیرونی ترین سطح زمین است، و شامل قاره ها و اقیانوس ها می شود. ضخامت پوسته میتواند بین 5 تا 8 کیلومتر زیر اقیانوس ها و 24 تا 56 کیلومتر زیر قاره ها تغییر کند.

### 1-8-3 نیروگاههای زمین گرمایی

در برخی مناطق از پوسته ی زمین که شرایط مساعدی وجود دارد، می توان با حفر زمین به دماهای بالا دست یافت. طبق برآوردهای انجام شده انرژی ذخیره شده در پوسته ی زمین تا عمق 3000 متر،  $43 \times 10^{24}$  ژول است که 85% از این انرژی در دمای کمتر از 100 درجه است. برای تبدیل انرژی گرمای زمین باید از یک سیال که انتقال انرژی از طریق آن انجام شود،

استفاده کرد. معمولاً مناطقی که در آن آتشفشان یا زمین لرزه‌ی مستمر وجود دارد برای ساخت نیروگاه مناطق مناسبی به شمار می‌روند. زیرا در این مناطق دماهای بالاتر در نقاط نزدیک تری به سطح زمین وجود دارد. حرارت زیر زمین توسط یک سیال که برای انتقال انرژی از آن استفاده می‌شود و میتواند آب داغ یا بخار یا هر دو باشد، به سطح زمین انتقال می‌یابد. بخار داغ یا آب داغ چاه‌های حفر شده در نیروگاه‌های زمین گرمایی باید دمای بالا (150 تا 370 درجه) داشته باشند. برای دست‌یابی به این دما باید چاه‌های عمیق به درون زمین حفر کرد و سپس آب داغ را به سطح زمین پمپ کرد. به طور معمول، این چاهها حدود 2 مایل عمق دارند.

#### 1-8-4 انواع نیروگاههای زمین گرمایی

نیروگاههای زمین گرمایی به سه نوع اصلی تقسیم می‌شوند:

- 1- نیروگاههای بخار خشک<sup>1</sup> که مستقیماً از بخار پمپ شده برای چرخاندن توربین استفاده می‌کنند. نخستین نیروگاه از این نوع، در سال 1904 در ایتالیا ساخته شد.
  - 2- نیروگاههای بخار درخشنده<sup>2</sup>؛ در این نوع از نیروگاه‌های زمین گرمایی آب داغ در فشار بالا از عمق زمین به سطح آن پمپ می‌شود؛ سپس به بخار تبدیل میشود تا توربین را بچرخاند. وقتی بخار سرد شد به آب تبدیل می‌شود و به عمق زمین برگردانده می‌شود تا چرخه کامل شود. اغلب نیروگاههای زمین گرمایی از این دسته هستند.
  - 3- نیروگاههای چرخه - دوتایی<sup>3</sup>؛ حرارت آب داغ را گرفته و به مایع دیگری - سیال سیستم - منتقل می‌کنند. گرمای آب، سیال سیستم را به بخار تبدیل می‌کند و سیال بخار شده توربین را می‌چرخاند.
- تفاوت این سه سیستم در ادامه شرح داده می‌شود.

#### 1-8-5 نیروگاههای بخار خشک

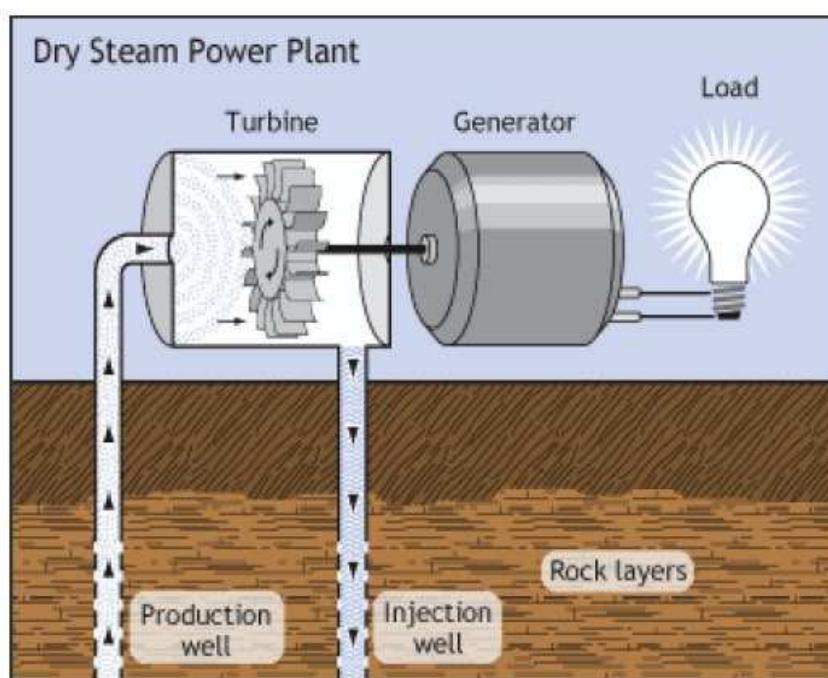
سیال کارِ نیروگاه‌های بخار خشک غالباً بخار آب است. همان گونه که در شکل 1-15 نشان داده شده است، بخار از اعماق زمین توسط یک چاه تولید<sup>4</sup> بالا می‌آید، توربین را می‌چرخاند

---

Dry Steam Plants<sup>1</sup>  
Flash Steam Plants<sup>2</sup>  
Binary Cycle Power Plants<sup>3</sup>  
Production well <sup>4</sup>

و سپس سرد شده، انرژی خود را از دست می دهد و به چاه تزریق<sup>1</sup> می رود تا به منبع ذخیره ی آب در اعماق زمین بازگردد. در این روش نیاز به سوختن سوخت های فسیلی و نیز نیاز به انتقال و ذخیره ی سوخت نیست.

نیروگاه های بخار خشک قدیمی ترین نوع از این دسته از نیروگاههای زمین گرمایی هستند. تکنولوژی بخار خشک امروزه در گیزرها (چشمه های آب گرم خاص) در شمال کالیفرنیا به کار می رود ؛ کالیفرنیا بزرگترین منبع تولید برق زمین گرمایی در دنیا به شمار می رود. این نیروگاهها اندکی بخار اضافه و مقدار بسیار کمی گاز از خود منتشر می کنند.

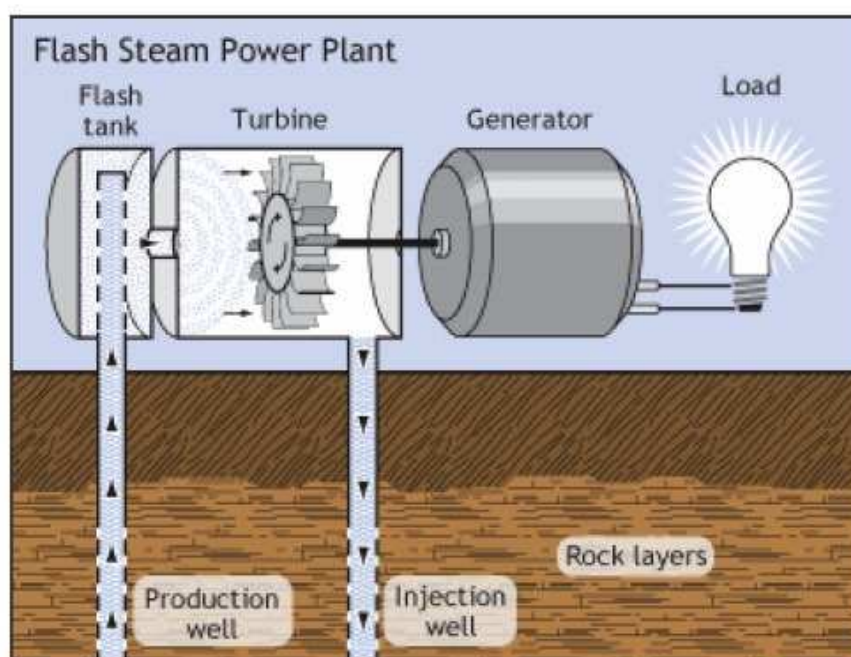


شکل 1- 15- نیروگاههای بخار خشک<sup>[24]</sup>

#### 1-8-6 نیروگاههای بخار درخشان *Flash Steam*

تکنولوژی نیروگاه های بخار درخشان در زلاندنو<sup>2</sup> اختراع شد. به دلیل وجود فراوان چشمه های فوران کننده ی آب داغ در سطح زمین این نوع نیروگاهها رایج ترین گونه در نیروگاه های زمین گرمایی هستند.

<sup>1</sup> Injection Well  
<sup>2</sup> New Zealand



شکل 1-16- نیروگاههای بخار فلش<sup>[24]</sup>

سیال کار سیستم -آب- در اعماق زمین و در دمای 180 درجه و فشار بالا از طریق «چاه تولید» به سطح زمین پمپ می‌شود. این سیال سپس وارد مخزن ذخیره<sup>1</sup> شده و فشار آن کاهش می‌یابد و به بخار داغ تبدیل می‌شود. این بخار با چرخاندن توربین، برق تولید می‌کند. بخار اضافه به آب تبدیل می‌شود و از طریق چاه تزریق به انبار زیرزمینی باز می‌گردد.

#### 1-8-7 نیروگاههای چرخه دوتایی (Binary Cycle)

اغلب چاه‌های مناطق زمین گرمایی آبی دمای متوسط زیر 200 درجه دارند. انرژی گرمایی این آب از طریق نیروگاه‌های دوتایی ساخته شده در این مناطق به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. چون این سیستم‌ها حلقه بسته هستند گاز یا مایعی از سیستم خارج نمی‌شود.

آب داغ زیرزمینی توسط یک چاه تولید<sup>2</sup> از انباری آب در اعماق زمین بالا می‌آید. این آب از یک مبادله کننده گرما<sup>3</sup> می‌گذرد و حرارت خود را به یک مایع هیدروکربن انتقال می‌دهد و آن را به دمای بالا می‌رساند تا بخار شود. این بخار سپس توربین را می‌چرخاند و آب داغ اولیه

<sup>1</sup> Flash Tank  
<sup>2</sup> Production well  
<sup>3</sup> Heat Exchanger



از طریق چاه تزریق به انبار آب زیرزمینی برمی گردد. این سیستم حلقه بسته است و هیچ گازی از این سیستم خارج نمی شود؛ پس این روش هیچ گونه پس ماند یا آلودگی ندارد.

#### 1-8-8 نیروگاههای زمین گرمایی در آمریکا<sup>[9]</sup>

آمریکا بیشترین ظرفیت نیروگاه زمین گرمایی را در دنیا دارد و بیشتر این نیروگاهها در کالیفرنیا قرار دارند. به جدول زیر توجه کنید:

جدول 1- 2- نیروگاههای زمین گرمایی در آمریکا

مکان	توضیحات	تصاویر
منطقه گیزرهای زمین گرمایی، کالیفرنیا	این منطقه در شمال کالیفرنیا است و بزرگترین نیروگاه بخار خشک دنیا را دارد. توان تولیدی آن در سال 1987 به حداکثر مقدار خود رسید. در آن زمان برای 1.8 میلیون نفر کافی بود.	
منطقه زمین گرمایی Navy، کالیفرنیا	این پروژه توسط شرکت Naval Air Weapons Station در دست آزمایش و تحقیق است. در حالت پیشینه این نیروگاه 273 مگاوات برق تولید میکند.	
منطقه زمین گرمایی Casa Diablo، کالیفرنیا	این نیروگاه توان حدود 40 هزار خانه را فراهم میکند.	
منطقه زمین گرمایی هاوایی،	در این منطقه سیال سیستم توسط چاه تولید به سمت سطح زمین می آید. بخارهای با چگالی کمتر به	

	<p>سمت نیروگاه انتقال داده شده و حدود 30 % برق جزیره بزرگ هاوایی را تولید میکند.</p>	هاوایی
	<p>این منطقه بین ایالات کالیفرنیا و نوادا قرار دارد. سه پروژه ی تولید برق در این منطقه وجود دارد. که در واندل و واین ایگل و آمده<sup>1</sup> قرار دارد.</p>	منطقه زمین گرمایی هانی لیک، کالیفرنیا و نوادا
	<p>این نیروگاه 30 % کل برق زمین گرمایی نوادا را تشکیل میدهند.</p>	منطقه زمین گرمایی نوادا، نوادا
	<p>مجموع توان تولیدی دو نیروگاه این منطقه 138 مگاوات است.</p>	منطقه زمین گرمایی Utah
	<p>این پروژه شامل ده نیروگاه در منطقه ایمپریال در جنوب کالیفرنیا است. مجموعاً حدود 327 مگاوات برق تولید میکند.</p>	منطقه دره ی ایمپریال، کالیفرنیا

#### 1-8-9 خلاصه

چشمه های فوران کننده ی بخار و آب داغ تنها بخش کوچکی از منابع زمین گرمایی هستند. ماگما و سنگ های خشک و داغ زمین یک منبع ارزان، تمیز و تقریباً نامحدود انرژی محسوب

<sup>1</sup> Amedee



می شوند. در جدول زیر ظرفیت نصب و درصد رشد این نوع نیروگاهها را بین سال های 2007 و 2010 در سراسر دنیا مشاهده می کنیم.

جدول 1- 3- رشد نیروگاههای زمین گرمایی در دنیا

کشور	ظرفیت نصب (MW)		درصد رشد ظرفیت
	2010	2007	
آمریکا	3086	2687	14.85
فیلیپین	1904	1969.7	-3.34
اندونزی	1197	992	20.67
مکزیک	958	953	0.52
ایتالیا	843	810.5	4.01
ژاپن	536	535.2	0.15
نیوزیلند	628	471	33.16
آیسلند	575	421	36.51
ال سالودور	204	204.2	-0.1
کاستاریکا	166	162.5	2.15
کنیا	167	129	29.66
نیکاراگوئه	88	87.4	0.69
روسیه	82	79	3.8
گینه نو	56	56	0
گواتمالا	52	53	-1.89
ترکیه	82	38	115.79
چین	24	27.8	-13.67
پرتقال	29	23	26.09
فرانسه	16	14.7	8.84
آلمان	6.6	8.4	-21.43
اتیوپی	7.3	7.3	0
اتریش	1.4	1.1	27.27
تایلند	0.3	0.3	0

450	1.1	0.2	استرالیا
10.05	10709.7	9731.9	مجموع

#### 1-8-10 مزیت های انرژی زمین گرمایی

- 1- در این نوع تبدیل انرژی آلودگی از طریق تولید گازهای مضر وجود ندارد. با این حال حفر کردن زمین، خود سبب آسیب زدن به محیط زیست است.
- 2- در همه زمان ها قابل دسترسی است، و این مساله تفاوت اساسی این انرژی در مقایسه با انواع انرژی های تجدید پذیر دیگر است.
- 3- این انرژی می تواند به شکل های مختلف مورد استفاده قرار بگیرد. برای مثال تبدیل انرژی برای تولید برق، استفاده از انرژی گرمایی آن برای گرم کردن خانه ها و استفاده در مراکز گلخانه ای.

#### 1-9 انرژی باد [7]

منشأ اصلی انرژی باد انرژی خورشیدی است. توزیع نامتعادل دما — که ناشی از تبدیل انرژی تابشی خورشید به انرژی گرمایی است. — در مناطق مختلف زمین — و به طور خاص در سطح زمین و جو آن — موجب همرفت و حرکت توده های هوا و ایجاد باد میشود. از طرف دیگر، زمین های با رطوبت کم گرمای خود را سریع تر از دریاها به هوا انتقال می دهند. این تفاوت دمایی، یک سیستم همرفت در اتمسفر زمین پدید می آورد.

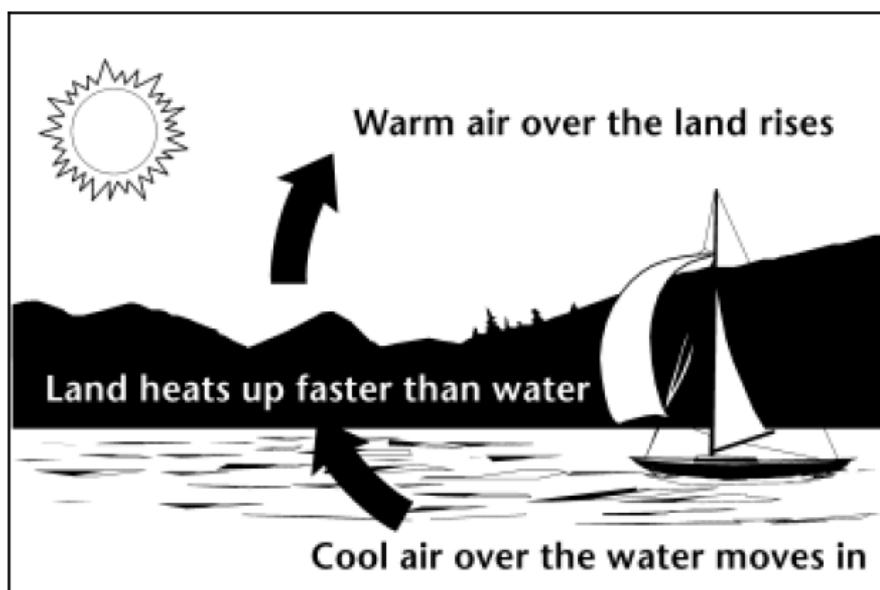


شکل 1-17- نیروگاه بادی

امروزه حدود  $72\ TW$  انرژی باد به صورت تجاری قابل بهره برداری است و این مقدار بسیار بیشتر از  $15\ TW$  انرژی استفاده شده در کره زمین در همه اشکال خود در سال 2005 می باشد.

#### 1-9-1 تعریف انرژی باد

انرژی حاصل از حرکت توده های هوا به سبب پدیده ی همرفت در لایه ی اتمسفر را گویند. انرژی باد برای تولید توان مکانیکی یا الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد. توربین های بادی انرژی جنبشی باد را به توان مکانیکی تبدیل می کنند. این توان مکانیکی برای اعمال خاصی مورد استفاده قرار می گیرد؛ مثل فشردن و آرد کردن دانه های گندم یا پمپ کردن آب و یا توسط ژنراتور به برق تبدیل شود.



شکل 1-18- تفاوت های دمایی آب و زمین و ایجاد باد<sup>[25]</sup>

شکل 1-18 نشان می‌دهد که عدم تعادل دمایی بین خشکی و دریا موجب ایجاد همرفت در لایه اتمسفر و به وجود آمدن باد می‌شود. زمین سریع‌تر از خشکی هوا را گرم می‌کند. هوای گرم اطراف خشکی به سمت لایه‌های بالاتر حرکت می‌کند. و هوای سرد روی سطح آب دریاها نیز به دلیل پدیده‌ی همرفت -باد- به سمت خشکی حرکت می‌کند.

باد یکی از تمیزترین انرژی‌هاست و فراوان‌ترین منبع انرژی در کره‌ی زمین است. میزان انرژی تولید شده توسط یک توربین بادی به بزرگی آن بستگی دارد. یک توربین بادی بزرگ می‌تواند تا چند صد مگاوات برق تولید کند؛ همچنین یک توربین بادی کوچک می‌تواند تا 100 کیلووات برق تولید کند. توربین‌های کوچک می‌توانند برای مصارف مستقل خانگی یا تجاری یا به عنوان برق اضطراری استفاده شوند. توربین‌های کوچک‌تر برای مصارفی مثل شارژ کردن باتری قایق‌ها استفاده می‌شوند.



شکل 1-19- توربین های 750 کیلوواتی در مینسوتا [26]

#### 1-9-2 انواع توربین های بادی

امروزه بر اساس جهت حرکت و چرخش شفت دو نوع توربین بادی وجود دارد:

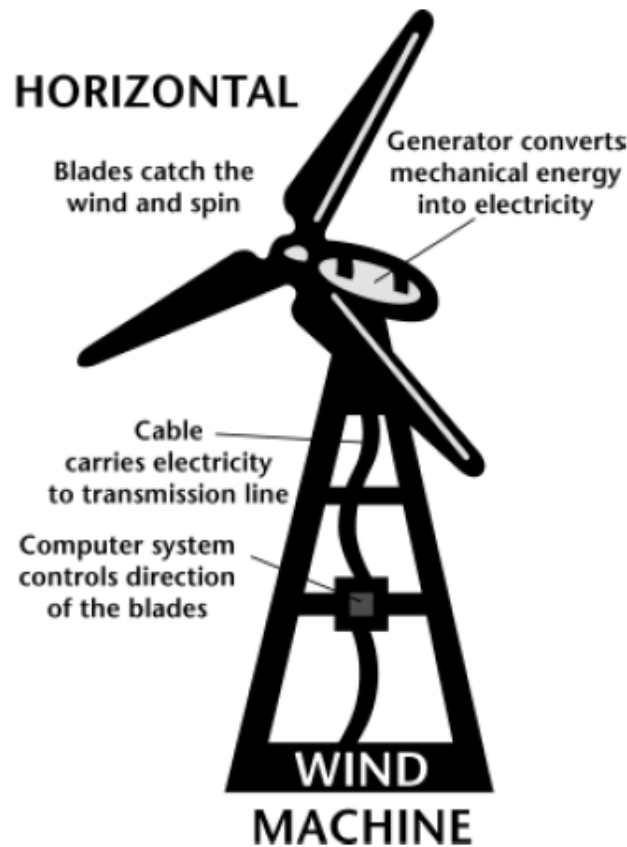
1- ماشینهای بادی افقی محور

2- ماشینهای بادی عمودی محور

توربین های افقی محور کاربرد گسترده تری دارند، و حدود 95 % از انواع توربین های بادی را شامل می شوند. توربین های بزرگ در مزارع بادخیز به هم متصل میشوند تا توان بیشتری به شبکه تحویل دهند.

#### الف- توربین های افقی محور

اغلب توربین های بادی از نوع توربین های افقی محور هستند. شماتیک این گونه توربین ها در شکل 1-20 آمده است.



شکل 1-20- نمای شماتیک یک توربین افقی محور

بالهای توربین های افقی محور مثل ملخ هواپیماست. یک مدل معمولی این توربین به درازای یک ساختمان 20 طبقه میباشد و از سه باله تشکیل شده است که 60 متر طول دارد. بزرگترین توربین بادی افقی محور جهان باله هایی بزرگتر از یک زمین فوتبال را داراست. باله ها با جذب باد شروع به چرخیدن می کنند. سپس توان مکانیکی تولید شده برای تولید برق به یک ژنراتور انتقال داده می شود. یک سیستم کامپیوتری جهت حرکت باله ها را کنترل میکند.

#### ب- توربین های عمودی محور<sup>1</sup> (VAWT)

<sup>1</sup> Vertical Axis Wind Turbine



شکل 1- 21- توربین عمودی محور در مارتیگنی، سوییس [27]

در توربین‌های بادی با محور عمودی روتور به صورت عمودی قرار می‌گیرد. مهم‌ترین برتری این نوع از توربین‌های بادی آن است که نیازی به تنظیم جهت قرارگیری نسبت به جهت وزش باد را ندارند. این نکته در مکان‌هایی که جهت وزش باد خیلی متغیر است، مثلاً در بالای ساختمان‌های مسکونی، یک امتیاز به شمار می‌رود. مهم‌ترین عیب این نوع توربین‌ها، کم بودن سرعت دورانی آنها و در نتیجه زیاد بودن گشتاور و هزینه ی بیشتر سیستم انتقال توان و همچنین طراحی و تحلیل پیچیده ی ایرفویل<sup>1</sup> (پره ها) است. با توجه به عمودی بودن محور، جعبه دنده و ژنراتور می‌توانند در نزدیکی زمین قرار گیرند که این موضوع دسترسی به این تجهیزات را برای نگهداری و تعمیر آسان‌تر می‌کند.

<sup>1</sup> Air Foil



توربین‌های بادی با محور عمودی به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند. دو نوع عمده ی آنها، توربین‌های داریوس 1 و ساوونیوس 2 هستند.

#### 1-9-2 نیروگاه‌های بادی

نیروگاه‌های بادی (مزارع بادی) مجموعه ای از توربین‌های بادی هستند که برای تولید برق در مساحت گسترده ای پراکنده شده اند.

بزرگترین نیروگاه بادی جهان (ساخته شده در تگزاس، سال 2009) شامل 627 توربین بادی (ساخت شرکت های میتسوبیشی و زیمنس) میباشد و دارای ظرفیت نصب 781/5 مگاوات است. برای پروژه ساخت و نصب این نیروگاه یک بلیون دلار هزینه شده است. و ظرفیت تولید آن برای تأمین برق بیش از 250 هزار خانوار کافی است.

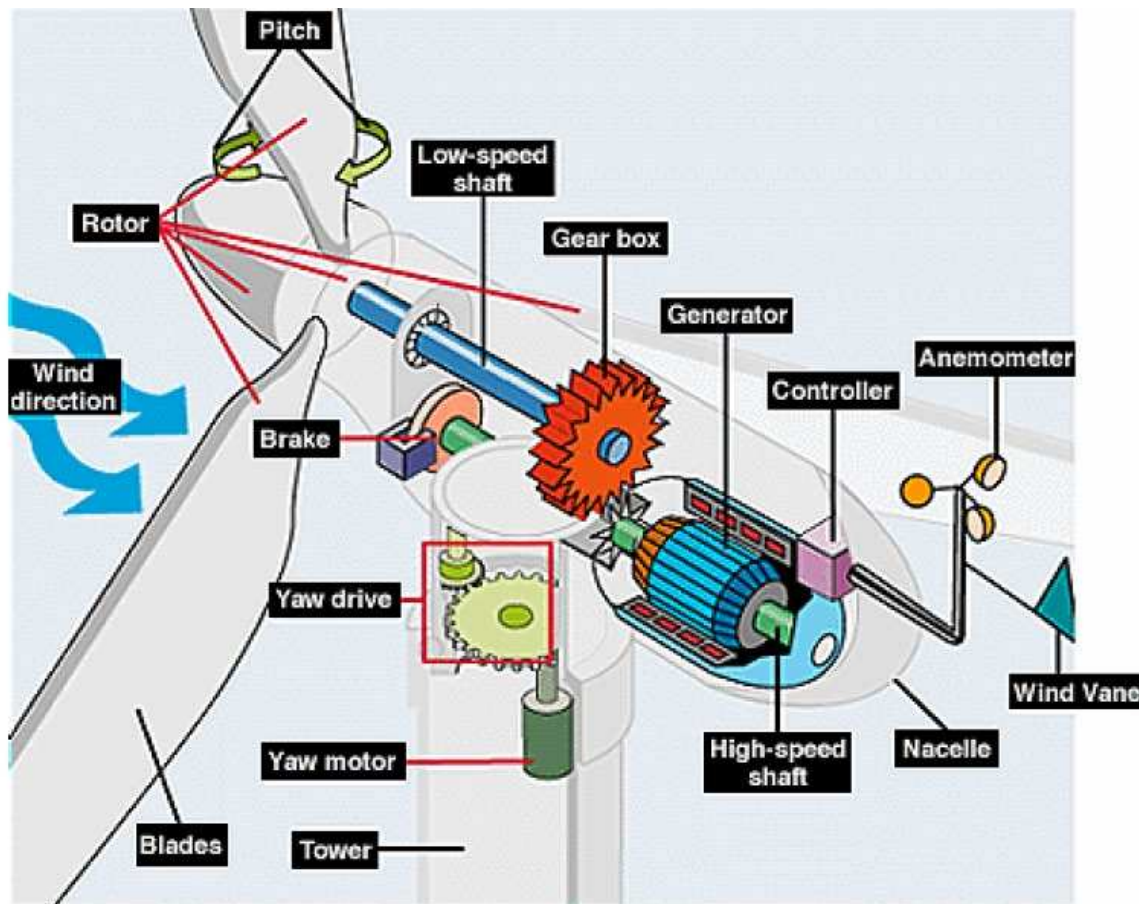


شکل 1-22- نیروگاه بادی در راسکو، تگزاس، آمریکا

<sup>1</sup> Darrieus wind turbine

<sup>2</sup> Savonius wind turbine





شکل 1-22- اجزای داخلی یک توربین بادی افقی محور<sup>[28]</sup>

**Anemometer** : سرعت باد را اندازه گیری می کند و آن را به کنترلر می فرستد.

**Blades** : هر توربین دو یا سه باله ( ملخک ) دارد. باد باعث می شود باله بچرخد.

**Gear Box** : دنده ها می توانند شفت با سرعت پایین را به شفت با سرعت بالا وصل کنند و سرعت را از حدود 30-60 دور در دقیقه به 1000-1800 دور در دقیقه (سرعت چرخش مورد نیاز اغلب ژنراتورها برای تولید برق) برسانند. جعبه دنده بخش سنگین و گران توربین است و مهندسين به دنبال ژنراتورهایی برای توانایی کارکرد در سرعت های چرخش پایین تر هستند تا نیازی به این جعبه دنده نداشته باشند.

**Generator** : معمولاً یک ژنراتور القایی بدون پوشش است که برق را با فرکانس 50 یا 60 هرتز تولید می کند.

**High Speed Shaft** : ژنراتور را درایو می کند.

**Low speed Shaft** : روتور این شفت را با سرعت (30-60 rpm) می چرخانند.

**Brake** : یک دیسک ترمز برای مواقع اضطراری که می تواند به صورت هیدرولیکی، مکانیکی یا الکتریکی عمل کند.

**Controller** : کنترلر در سرعت باد حدود 12-25 km/h ماشین را راه اندازی می کند و در سرعت 90 km/h نیز آن را خاموش می کند؛ و اجازه نمی دهد در سرعت های بالاتر کار کند چون ممکن است به آن آسیب وارد شود.

**Nacelle** : یک پوشش بیرونی است برای جعبه دنده، شفت های سرعت بالا و پایین، ژنراتور، کنترلر و ترمز. بعضی از آنها آنقدر بزرگ هستند که یک هلیکوپتر به راحتی روی آن فرود می آید.

**Pitch** : برای محافظت باله ها از چرخش در بادهای خیلی سنگین و سریع و یا خیلی سبک و آرام طراحی شده است.

**Rotor** : باله ها و هسته ی اصلی را شامل می شود.

**Tower** : برج از فولاد لوله ای درست شده است. با افزایش طول برج و افزایش ارتفاع، سرعت باد افزایش می یابد<sup>1</sup> و باد بیشتری جذب می شود و برق با توان بیشتری تولید می شود.

**Wind Vane** : جهت باد را اندازه می گیرد و درایو «یاو» را برای جهت گیری درست در برابر باد هدایت می کند.

**Yaw Drive** : هنگام تغییر جهت باد مسیر حرکت روتور را پایدار نگاه می دارد.

**Yaw Motor** : توان حرکت درایو را فراهم می کند.

میزان توان قابل تبدیل به انرژی الکتریکی در یک توربین بادی از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$P = \frac{1}{2} \alpha \rho \pi r^2 v^3 \quad (3-1)$$

---

<sup>1</sup> معمولاً با افزایش ارتفاع سرعت حرکت باد تا 160  $\frac{km}{h}$  افزایش میابد.

که در این معادله  $P$  توان تبدیل شده در توربین و  $\alpha$  ضریب بهره وری توربین است — وابسته به طراحی توربین است<sup>1</sup>؛  $\rho$  تراکم باد برحسب  $Kg/m^3$ ،  $r$  شعاع پره های توربین و  $v$  سرعت باد بر حسب  $\frac{m}{s}$  است.

### 3-9-1 خلاصه

هدف از این بخش ارائه ی شیوه ی تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی الکتریکی بود. انرژی باد قطعاً یکی از انرژی های برتر آینده خواهد بود. چرا که مزیت های زیادی دارد. ارزان قیمت و قابل اعتماد است. توربین های بادی توان های حدود 100 کیلووات تا چند مگاوات را فراهم می کنند. توربین های بزرگتر هم بازده ی بالاتر و هم صرفه بیشتری دارند. توربین های زیر 100 کیلو وات برای مصارف خانگی، دیش های مخابراتی و پمپ کردن آب در مزارع استفاده می شود.

استفاده از انرژی باد سریعترین رشد را در بین انرژی های تجدید پذیر داشته است و در زمان حاضر تولید جهانی آن حدود  $31000 MW$  است. پیش بینی شده است که تا سال 2020 انرژی باد 6% از کل تولید توان الکتریکی دنیا را تشکیل می دهد. توربین های بادی کاملاً بدون آلودگی هستند و می توانند در نقاط دور افتاده مثل کوهستان ها یا جزایر دریاها نصب شوند. نیاز به تعمیر و نگهداری کم نیز یکی دیگر از مزایای آن ها است.

---

1 آلبرت بتز Albert Betz فیزیکدان آلمانی در سال 1919 ثابت کرد که یک توربین بادی حداکثر 59% از انرژی باد را به برق تبدیل می کند؛ و به این دلیل  $\alpha$  حداکثر 59% خواهد بود.

---

## فصل دوم

### انرژی خورشیدی

#### 1-2 مقدمه

انرژی خورشیدی به عنوان یک انرژی تجدید پذیر شناخته شده است. شدت تشعشع انرژی خورشیدی که به سطح زمین می رسد سالانه معادل انرژی حاصل از سوختن 92 بیلیون تن نفت است. انرژی تابشی خورشید که طی یک ساعت به سطح زمین می رسد معادل یک سال مصرف انرژی در کل کره ی زمین است.

#### 2-2 تابش خورشیدی

تابش خورشیدی توسط شار انرژی که از خورشید به زمین می رسد توصیف می شود. این انرژی در یک دسته موج با فرکانس های مختلف به زمین می رسد. برخی با چشم غیر مسلح قابل دیدن هستند و برخی نه.

#### 1-2-2 تابش مستقیم

این تابش به صورت تغییر نیافته، مستقیم از خورشید به زمین می رسد.

#### 2-2-2 تابش پراکنده

بخشی از تابش خورشید را شامل می شود که از اتمسفر می گذرد ولی توسط ابرها و ذرات گردوغبار در هوا، درختان و کوه ها جذب و یا بازتاب داده می شود. تابش پراکنده در همه جهات پخش می شود و به همین دلیل سایه درست نمی کند. سطوح افقی این نوع تابش را تا حدود دو برابر بیشتر بهتر از سطوح عمودی دریافت می کنند.

## 2-2-3 تابش های بازتابی

این نوع تابش توسط یک سطح بازتاب داده می شود. مقدار این بازتاب به ضریب بازتاب دهنده ی سطح بستگی دارد. در این حالت سطوح عمودی همه این نوع تابش را جذب می کنند.

## 2-2-4 تابش کلی

به مجموع همه انواع تابش های مطرح شده در بندهای بالا تابش کلی می گویند .

در بازار، کلکتورهای خورشیدی متنوعی وجود دارد و هریک از آنها از یکی از انواع این تابش های خورشید برای عملکرد خود بهره می جوید. به عنوان مثال کلکتورهای خورشیدی متمرکز کننده تنها تابش مستقیم را جذب می کنند. کلکتورهای خورشیدی مسطح قابلیت دریافت تابش مستقیم و پراکنده را دارند. به همین دلیل کلکتورهای متمرکزکننده خورشیدی در مناطقی مورد استفاده قرار می گیرد که گرد و غبار در حداقل ممکن خود باشد.

تولید برق خورشیدی امروزه در حال پیشرفتهای نوید بخشی است. فن آوری های مربوطه به سرعت در حال توسعه بوده و در نتیجه قیمت برق با این روش ها به صورت مدام کاهش میابد. به علاوه توجه روز افزون به اثرات مخرب زیست محیطی سایر انواع انرژی ، مزایای برق خورشیدی را آشکار می سازد. اگر هزینه های خارجی<sup>1</sup> سوخت های فسیلی به قیمت این گونه انرژی ها اضافه شود هزینه تولید برق از روشهای حرارتی خورشیدی کمتر از هزینه تولید برق در نیروگاه سوخت فسیلی خواهد بود. نیروگاههای برق خورشیدی کمترین اثر را بر محیط زیست دارند. این نیروگاه ها یا اصلا گاز مخرب منتشر نمیکنند یا مقدار ناچیزی منتشر میکنند. مهمترین اثر زیست محیطی نیروگاههای خورشیدی نیاز به زمین با وسعت زیاد معادل 15 جریب فرنگی (1 جریب = 4047 متر مربع) برای ظرفیتی معادل 1 مگاوات برق است. البته باید خاطر نشان کرد که این مقدار زمین کمتر از زمین مورد نیاز برای استخراج و حمل زغال سنگ به نیروگاههای زغال سوز یا زمین مورد نیاز نیروگاههای آبی با همین توان تولید است. از طرفی در مناطقی مثل بیابان ها یا کویر که زمین ارزش چندانی ندارد و برای تولیدات دیگر مورد نیاز نیست نصب نیروگاههای خورشیدی توجیه پذیر می باشد.

امروزه شیوه ی تولید برق توسط آینه های سهمی گون جایگزینی برای شیوه های معمول تولید برق است. تا چند دهه ی دیگر، برج خورشیدی و آینه های مشجمی ، جایگزین جدیدی برای نیروگاههای سوخت فسیلی به حساب خواهند آمد. با پیشرفتهای نوید بخش در فن آوری، شیوه

<sup>1</sup> Externalities

های مختلف تولید برق خورشیدی سهم قابل قبولی در تولید انرژی برق از مجموع تولید برق در جهان را به خود اختصاص خواهند داد.

## 2-3 نگاه کلی به تولید برق خورشیدی

احداث نیروگاههای خورشیدی در مناطق کاملاً دور افتاده انتخاب نوید بخشی در راستای برنامه های راهبردی و اهداف دراز مدت تامین انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی است. امروزه فن آوری های گوناگون برای تولید برق خورشیدی در دسترس است. برای مثال نیروگاه آینه های سهمی گون کالیفرنیا با ظرفیت 354 مگاوات، در مدت کارکرد ده ساله پنج هزار گیگاوات ساعت برق به شبکه تحویل داده است که 80 % کل تولید برق خورشیدی دنیاست. همچنین ظرفیت سالانه تولید برق توسط سلول های نوری به 80 مگاوات رسیده است. نیروگاههایی که برای فن آوریهای دریافت کننده ی مرکزی و آینه مشجمی نصب شده اند با بازدهی معادل 15 تا 25 درصد برای تبدیل انرژی خورشیدی به برق کار میکنند. نیروگاههایی که برای ارائه ی دودکش خورشیدی و استخر خورشیدی نصب شده اند با کارکرد قابل اطمینان و نصب ساده ی قسمتهای اصلی به خصوص برای کشورهای در حال توسعه مناسب به نظر میرسند. بزرگترین مانع احداث نیروگاههای خورشیدی هزینه ویژه سرمایه گذاری نسبتاً بالای آنهاست.

## 2-4 محدودیت ها

به دلیل تغییرات طبیعی انرژی خورشیدی، برق خورشیدی به طور محدود در دسترس است. امکان تولید برق خورشیدی در مواقع اوج بار که برق قیمت بیشتری دارد محدود است همانگونه که تولید برق در مواقع عادی نیز دارای محدودیت هایی است. قابلیت اطمینان نیروگاههای خورشیدی به شدت به سطح فن آوری های مورد استفاده بستگی دارد (مثل نوع سلول های خورشیدی انتخاب شده برای نیروگاه فتوولتاییک)؛ همچنین کنترل و اداره ی یک نیروگاه خورشیدی امری مشکل است. به هر حال دو راه حل کلی برای این اشکالات وجود دارد :

الف) اولین راه حل، پیوند نیروگاه خورشیدی با یک سیستم پشتیبان سوخت فسیلی است. سیستم پشتیبان سوخت فسیلی تغییرات طبیعی انرژی خورشیدی را جبران کرده و تولید برق را در هنگام شب ممکن میسازد و ضریب ظرفیت یعنی زمانهایی را که نیروگاه با تمام قدرت کار میکند افزایش میدهد و سرانجام دسترسی به برق در بیش از 8 هزار ساعت در سال را امکان پذیر میکند. امکان پیوند سیستم پشتیبان سوخت فسیلی با چرخه نیروگاههای خورشیدی از نوع آینه های سهمی گون، دریافت کننده های مرکزی و آینه های مشجمی وجود دارد. نیروگاههای خورشیدی از نوع

دودکش خورشیدی، استخر خورشیدی و سلول نوری به سیستم پشتیبان مجزا و جدا از چرخه ی خود نیاز دارند. برای پاخ سریع به تغییرات طبیعی انرژی خورشیدی سیستم های پشتیبان باید فقط از نیروگاههای گازی باشند.

ب) دومین راه حل ترکیب منبع ذخیره انرژی با نیروگاه خورشیدی است. ترکیب سیستم ذخیره انرژی با مولدهای متمرکز کننده ی خورشیدی باعث افزایش ساعات کارکرد و جبران نوسان های کوتاه مدت در میزان انرژی خورشیدی دریافتی خواهد شد. چند نوع ذخیره ساز انرژی گرمایی برای نیروگاه خورشیدی از نوع آینه های سهمی گون و دریافت کننده مرکزی با امکان تولید برق برای 12 ساعت با ظرفیت نامی دارند ساخته شده است.

استخر خورشیدی تا حدود 24 ساعت و دودکش خورشیدی تا 1 ساعت انرژی را به طور طبیعی ذخیره میکند. در نیروگاههای خورشیدی از نوع آینه های مشجمی، موتور استرلینگ و سیستم نوری با استفاده از باتریهای الکتروشیمیایی امکان ذخیره نمودن انرژی وجود دارد. اگر در آینده قیمت نفت و ظرفیت تولید قطعات نیروگاههای خورشیدی افزایش یابد احتمالاً بزرگترین مانع ساخت نیروگاههای خورشیدی هزینه ویژه سرمایه گذاری آنها خواهد بود که گاه طرح های ساخت را غیر اقتصادی و ناممکن میسازد. به هر حال در حال حاضر تجاری کردن سریع انواع فن آوریهای انرژی های تجدید پذیر و پاکیزه گامی به سوی حفظ محیط زیست می باشد. در این خصوص نیز دو راه حل وجود دارد:

الف) نخست اینکه افزایش تولید قطعات ارزان قیمت باعث کاهش قابل ملاحظه در هزینه ی سرمایه گذاری نیروگاههای خورشیدی در 15 سال گذشته شده است و هنوز امکان توسعه این قطعات وجود دارد. معمولاً استفاده از قطعات ارزان قیمت باعث کاهش بازده نیروگاه خواهد شد. در اینصورت این میزان کاهش سرمایه گذاری و بازده مربوطه باید متوازن باشد تا فن آوری های خورشیدی در سطح جهانی مورد قبول قرار گیرند و تقاضای روزافزون برای قطعات باعث تولید انبوه آنها گردد.

ب) راه حل دیگر ترکیب نیروگاههای خورشیدی با نیروگاههای سوخت فسیلی است. در این روش جمع کننده ها با دمای بالا به یک سیکل ترکیبی پیشرفته پیوند می خورند و از حرارت خورشیدی برای تولید بخار یا پیش گرم کردن هوای احتراق استفاده میشود. بنابراین بازده ی تبدیل



انرژی خورشیدی یا سوخت به برق نسبت به نیروگاههایی که تنها از انرژی خورشیدی استفاده میکنند افزایش خواهد یافت. کارکرد نیروگاه خورشیدی نه تنها وابسته به میزان تقاضای انرژی بلکه وابسته به شرایط آب و هوایی منطقه نصب نیروگاه نیز می باشد.

تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریکی یا مکانیکی بیش از یک قرن مورد توجه و مطالعه بوده است. در سال 1872 شخصی به نام موشو در نشریه فرانسوی پاریس اکسپوزیسیون ایده ای را مطرح کرد که در آن بوسیله ی یک سری متمرکزکننده ی خورشیدی و یک جاذب تابش خورشیدی بخار آب تولید کرده و به یک موتور حرارتی برای تولید برق رسانده میشد. در ابتدای توسعه ی سیستم های تبدیل انرژی خورشیدی، غالباً توجه به سیستم های حرارتی مکانیکی در ابعاد کوچک ( تا سقف 100 کیلووات ) و برای پمپاژ آب معطوف بوده است. از سال 1975 به بعد نیروگاههای حرارتی خورشیدی در ابعاد بزرگ ساخته شد و مورد بهره برداری قرار گرفت. نیروگاههای تجاری از این نوع نیز در حال حاضر در ابعاد 30 MW تا 80 MW (در حالت تولید اسمی) برای بیش از یک دهه مورد استفاده قرار گرفته اند.

رشد سریع تقاضای انرژی در طول قرن 21 ام با مشکلاتی از قبیل مساحت اراضی مورد نیاز برای استقرار نیروگاههای حرارتی، آثار تخریبی بر محیط زیست، کاهش منابع تولید انرژی و توزیع پراکنده ی این منابع در سطح کره ی زمین مواجه خواهد بود. با فرض رشد ملایمی حدود 1.4 % برای جمعیت کشورهای در حال توسعه ، طبق استاندارد جهانی، جمعیت جهان طی 50 سال آینده از حدود 5 میلیارد به حدود 10 میلیارد خواهد رسید و تقاضای انرژی مرتبط با آن نیز 2.5 تا 3 برابر خواهد شد. با توجه به این رشد بالا در تقاضای انرژی و نیز کاهش منابع فسیلی و مشکلات زیست محیطی تولید انرژی با استفاده از منابع فسیلی و هسته ای، توجه همگان به استفاده بهینه از انرژی، کنترل مصرف آن از طریق استفاده از سیستم های با بازده ی بالاتر و نیز استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر معطوف شده است. انرژی خورشیدی همواره به عنوان یکی از مهمترین گزینه های انرژی های تجدیدپذیر مورد توجه بوده است.

کشور ایران باتابش متوسط سالیانه حدود  $1900 \frac{kWh}{m^2}/h$  جزو کشورهای غنی از نظر تابش خورشیدی می باشد؛ علاوه بر این در ایران نواحی زیادی دارای تابش بالاتر از  $2300 \frac{kWh}{m^2}/h$  هستند که در واقع از بهترین گزینه ها از نظر جغرافیایی برای احداث نیروگاه حرارتی خورشیدی است. در حال حاضر سهم تولید برق خورشیدی در کشور نزدیک به صفر است. تنها چند طرح آزمایشی از جمله نیروگاه 500 کیلوواتی شیراز توسط دانشگاه شیراز با همکاری وزارت نیرو بهره

بردارای شده است. سهم دیگر انرژی های تجدید پذیر از کل برق تولیدی کشور نیز بسیار ناچیز است (کمتر از 5 %). در جدول 2-1 ظرفیت انواع نیروگاههای نصب شده در کشور آمده است. همانطور که در این جدول مشاهده میشود، بیشترین سهم تولید برق را در کشور نیروگاههای حرارتی با سوخت های فسیلی دارند. با توجه به گران شدن سوخت های فسیلی و نیز تلاش دیگر کشورها برای استفاده از انرژی های تجدیدپذیر استفاده از این نیروگاهها کم کم توجه اقتصادی خود را از دست میدهند. با توجه به مصرف روز افزون انرژی و نیز این واقعیت که تعدادی از نیروگاههای با اهمیت کشور در انتهای عمر مفید خود هستند، تأسیس نیروگاههای جدید در کشور غیرقابل اجتناب است. لازم است که در تصمیم گیری درباره ی تأسیس نیروگاه های جدید، نیروگاه های تجدید پذیر از جمله نیروگاههای حرارتی خورشیدی نیز مورد توجه قرار گیرند.

جدول 2- 1- ظرفیت نصب انواع نیروگاهها در ایران<sup>[10]</sup>

ردیف	نوع نیروگاه	تعداد واحد های منصوب	توان نامی (MW)	درصد از کل
1	بخاری	98	15704	28
2	گازی	238	18593	33.1
3	چرخه ترکیبی	101	13664	24.3
4	برق آبی	107	7703	13.7
5	دیزلی	158	517	0.9
6	انرژی های نو	163		
	مجموع	865	56181	100

## 2-5 انواع نیروگاههای حرارتی خورشیدی

### 2-5-1 مقدمه

در نیروگاههای حرارتی خورشیدی، انرژی تابشی خورشید توسط یک گیرنده جذب شده و از این انرژی به عنوان ورودی یک ماشین گرمایی استفاده می شود. این انتقال انرژی میتواند توسط سیال ماشین گرمایی و یا توسط یک سیال واسطه صورت گیرد. تقسیم بندی نیروگاههای حرارتی بسته به نوع گیرنده، نوع ماشین گرمایی، سیال ماشین گرمایی یا دمای منبع گرم ماشین گرمایی صورت می گیرد. به عنوان مثال اگر دمای منبع گرم ماشین گرمایی معیار طبقه بندی باشد، این نیروگاهها به سه دسته دمای پایین و دمای متوسط و دمای بالا طبقه بندی میشوند. در این گزارش این نوع نیروگاهها را بر حسب نوع گیرنده به دو نوع نیروگاه با متمرکزکننده<sup>1</sup> و بدون متمرکزکننده تقسیم

<sup>1</sup>Concentrator

میکنیم. از (3-) گاه های با متمرکز کننده میتوان به نیروگاههای با متمرکزکننده ی سهموی نادانی<sup>1</sup>، متمرکزکننده ی سهموی بشقابی<sup>2</sup>، متمرکزکننده ی انکساری<sup>3</sup> و برج خورشیدی<sup>4</sup> اشاره کرد. روش کارکرد هر یک از این نیروگاهها را در این فصل شرح می دهیم.

برای بررسی و مقایسه کارکرد این نیروگاهها دانستن تعاریف و روابط زیر الزامی است. همانطور که گفته شد هر نیروگاه خورشیدی را میتوان به سه بخش اصلی تقسیم کرد که شامل گیرنده خورشیدی، ماشین حرارتی و ژنراتور می باشد. بازده ماشین حرارتی و ژنراتور را با نمادهای  $\eta_{gen}$  و  $\eta_{th}$  (4-) بدهند. بازده گیرنده خورشیدی طبق رابطه زیر تعریف میشود:

$$\eta_c = \frac{Q}{I \cdot A_a} \quad (1-)$$

که در آن  $Q$  میزان حرارتی است که در واحد زمان توسط گیرنده جذب میشود و  $A_a$  مساحت جاذب است. و  $I$  جریان تحویلی ژنراتور سیستم است.

برای به دست آوردن بازده کل نیروگاه خورشیدی رابطه زیر را داریم.

$$\eta = \eta_c \eta_{th} \eta_{gen}$$

در گیرنده های خورشیدی با متمرکزکننده ضریبی به نام ضریب تمرکز طبق رابطه زیر تعریف میشود:

$$C = \frac{A_a}{A_p}$$

بدیهی است که این ضریب برای گیرنده های بدون متمرکزکننده برابر با 1 است. برای بررسی و مقایسه نیروگاهها از نظر اقتصادی شاخص های بسیاری تعریف شده است. ما در این بخش از دو شاخص (2-) مهمترین ها و پرکاربرد ترین ها هستند استفاده میکنیم. اولین آنها هزینه سرمایه گذاری<sup>5</sup> (IC) مربوط به نیروگاه است، و طبق رابطه زیر تعریف میشود:

$$IC = \frac{TCR}{CP}$$

<sup>1</sup>Parabolic trough systems

<sup>2</sup>Dish systems

<sup>3</sup>Refraction concentrator systems

<sup>4</sup>Power Towers

<sup>5</sup>Investment Cost

و واحد آن (US \$/kW) است. در این رابطه TCR نشان دهنده کل هزینه سرمایه گذاری و CP نشان دهندهی ظرفیت تولید توان اسمی نیروگاه است. کمیت دیگری که معمولاً برای مقایسه نیروگاههای مختلف به کار میرود، هزینه هم تراز شده انرژی الکتریکی<sup>1</sup> LEC (با واحد cts/kWh) است. این کمیت نشان دهندهی هزینه تمام شده برای تولید یک واحد انرژی الکتریکی است.

## 2-5-2 نیروگاه خورشیدی سلولهای نوری (فتوولتاییک)<sup>[1]</sup>

تنها روش مستقیم تولید الکتریسیته استفاده از تبدیل انرژی در سلول های فتوولتاییک است. در این روش از چرخه های حرارتی و تبدیل انرژی توسط میدان گردان که موجب اتلاف مقدار زیادی انرژی می شوند، استفاده نمی شود. سلولهای خورشیدی براساس پدیده فتوولتاییک قادر به تبدیل مستقیم پرتوهای خورشید به انرژی الکتریکی هستند و به همین دلیل در بسیاری موارد آنها را سلولهای فتوولتاییک می نامند. سلولهای خورشیدی در سال 1950 برای استفاده های خارج از جو زمین گسترش یافته و تاکنون نیز بهترین منبع تولید انرژی برق در دستگاههای فضایی بوده اند. این سلولها در سال های 1960-1970 در بیش از 1000 قمر مصنوعی استفاده شده اند. در اواسط دهه 1970 کوشش برای استفاده از این سلولها در روی زمین آغاز شد. اساساً تمام سلولهایی که تا به حال در زمین و فضا به کارگرفته شده اند از جنس نیمه هادی سیلیکون (Si) بوده اند، اما ممکن است در آینده سلولهایی از جنس گالیم، آرسناید (Ga As) و کادمیم سولفاید (Cals) نیز به کار روند. وقتی که یک فوتون در سلول جذب می شود، تولید بارهای آزاد مثبت و منفی می نماید، این بارها به بالا و پایین سلول رانده می شود. سطح بالای سلول با یک پوشش ضد انعکاس پوشیده شده است. ولتاژ هر سلول در حدود 0.5 ولت است و مقدار جریان آن نسبت مستقیم با سطح آن دارد. سلولهای منفرد را با توجه به توان مورد نظر در پنلها به صورت موازی برای گرفتن جریان دلخواه و سپس به صورت سری برای ایجاد ولتاژ لازم به هم متصل می نمایند. دیودهای موازی برای جلوگیری از سوختن احتمالی سلولها در اثر پدید آمدن سایه یا نوسانات پیش بینی نشده ی تابش خورشید در ساختار سلول ها به کار می روند. هنگامی که بعضی از سلولها در سایه قرار بگیرند این دیودها موجب می شوند تا جریان بجای عبور از سلولهای تاریک از دیودهای خارجی عبور نماید و به این ترتیب از آن سلول ها محافظت می کنند. در سطح زمین به منظور جلوگیری از فساد تدریجی سلول در مجاورت هوا به علت اکسید شدن اتصال های فلزی که موجب باز شدن مدارها می شود، پنلهای خورشیدی را به صورت کپسول در می آورند. موادی مانند شیشه یا

<sup>1</sup>Levelized electricity Cost

اپکسی<sup>1</sup> های سیلیکون بعنوان پوشش شفاف مقاوم در برابر جو، در جلوی پنلها مورد استفاده قرار می گیرند. چون این سلولها نیازی به سوخت های فسیلی یا هسته ای ندارند؛ لذا بعنوان یک منبع تولید توان الکتریکی در آینده، مورد توجه قرار گرفته اند.

هم اکنون آنچه مانع استفاده ی بیشتر از این سلولها در روی زمین می شود، گران بودن برق حاصل از آن ها در مقایسه با سایر منابع متداول انرژی الکتریکی است. با وجود این برای مناطق دور افتاده که دسترسی به برق شبکه ندارند و یا حمل سوخت به آنها مشکل است استفاده از سلولهای خورشیدی اقتصادی و قابل رقابت با هزینه های استفاده از مولدهای دیزلی است (Noghani & Noghani behambari, 2019; Noghani behambari & Rahnamamoghadam, 2020; Toranji et al., 2020)

جدول 2-2- اطلاعات خلاصه از نیروگاه های سلول نوری نصب شده بعد از سال 1991<sup>[11]</sup>

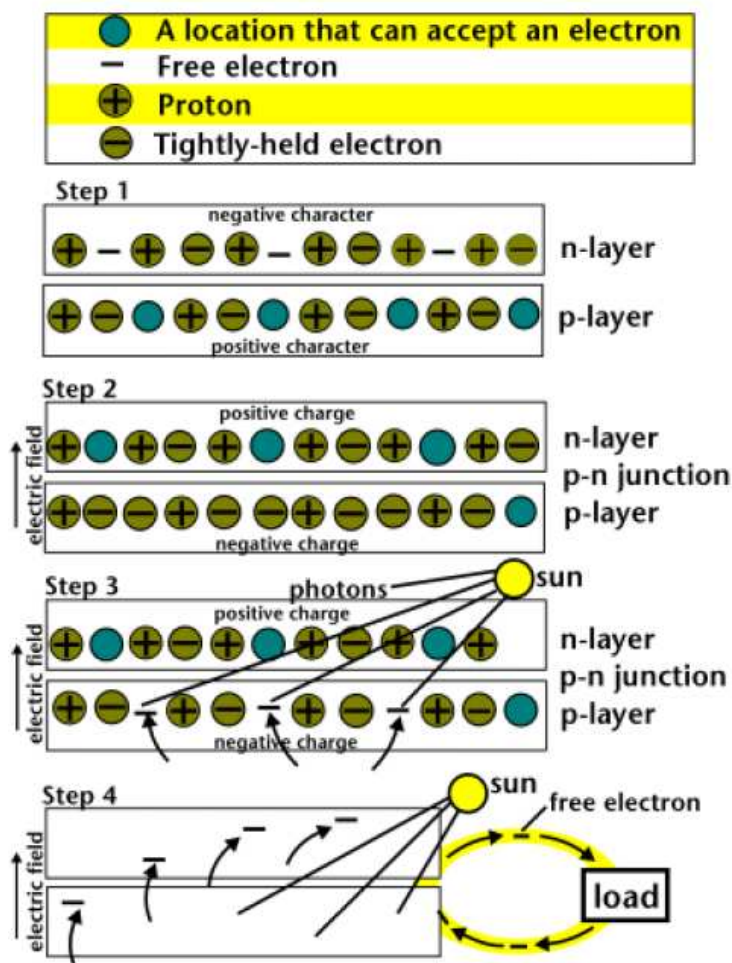
نام و مکان	توان (kW) - برق DC	آفتابگردان	شروع بهره برداری
نئورادرسی، آلمان	358	ندارد	1991
رندسبورگ، آلمان	70	ندارد	1991
کاساسیا، اسپانیا	100	ندارد	1991
مانفردونیا، ایتالیا	300	ندارد	1992
سیوالچن، اتریش	40	ندارد	1992
نئوفیلدبرن، سوئیس	75	ندارد	1992
بلین زونا، سوئیس	100	ندارد	1992
دیویس [APS]، آمریکا	479	ندارد	1992
دیویس [IPC]، آمریکا	188	تک محوری	1993
دیویس [SSI]، آمریکا	174	تک محوری	1993
کرم، آمریکا	502	تک محوری	1993
سری- سالرنو، ایتالیا	3300	ندارد	1994
تولدو، اسپانیا	1000	جزئی	1994

(اصلاحیه)

سلول های نوری بر روی پایه های ثابت یا پایه های آفتابگردان قابل نصب هستند. نیروگاه های سلولهای نوری که به صورت مستقل از شبکه نصب می شوند نیاز به یک باتری ذخیره کننده یا یک سیستم پشتیبان مانند دیزل ژنراتور را دارند تا در هنگامیکه تابش خورشید شدت کمی دارد با کمک آن برق به میزان لازم تأمین شود. سلولهای نوری در اولین برنامه های تحقیقاتی فضایی در سالهای دهه های 50 و 60 قرن بیستم توسعه یافتند. بعد از بحران انرژی در دهه 70 میلادی تطبیق این فن آوری برای کاربرد بر روی زمین بازرنگری شد. اگر چه فروش اصلی سلولهای نوری برای کاربرد آن ها در وسایل کوچک متمرکز است ولی روی بعضی سیستمهای بزرگ در محدوده ی توان چند مگاوات تحقیق درباره ی نحوه ی اتصال آن ها به شبکه در حال انجام می باشد. آلمان، سوئیس و استرالیا به تازگی برنامه هایی در راستای توزیع سیستمهای سلول نوری با ظرفیت 1 تا 5 کیلووات و قابل اتصال به شبکه در دست اجرا دارند. اتحادیه اروپا نیز پروژه های تکمیل کننده سیستمهای سلول نوری را تشویق و پشتیبانی می کند.

نور خورشید از فوتون ها تشکیل شده است که همان ذرات انرژی خورشیدی می باشند. این فوتون ها مقادیر مختلفی انرژی را با خود حمل می کنند که متناسب با طول موج آنهاست. وقتی فوتون ها با یک سلول فتوولتاییک برخورد می کنند ممکن است بازتاب داده شوند، به طور مستقیم عبور کنند یا جذب شوند. تنها فوتون های جذب شده انرژی را برای تولید برق فراهم می کنند. وقتی ماده ی سطح این سلول ها (که یک نیمه هادی است) مقدار کافی انرژی جذب کند، الکترون ها از اتم های ماده جدا می شوند و به سمت سطح سلول حرکت می کنند.

# PHOTOVOLTAIC CELL



شکل 2-1 ساختار فیزیکی یک سلول فتوولتائیک

با برخورد نور به مواد نیمه رسانا، انرژی نور جذب ماده ی نیمه رسانا می شود که باعث آزاد سازی الکترون در نیمه رسانا می شود. برای مثال، یک اتم سیلیکون 14 الکترون دارد که در سه لایه ی مختلف روی هم قرار گرفته اند. دو لایه ی اول که به مرکز نزدیک تر هستند، کاملاً پر شده اند. ولی لایه ی بیرونی 4 الکترون دارد که نیمه پر است. به همین دلیل اتم سیلیکون همیشه تمایل زیادی به جذب الکترون دارد تا لایه ی انتهایی خود را کامل کند. به همین دلیل 4 الکترون لایه ی آخر را با 4 الکترون لایه ی آخر اتم همسایه اش به اشتراک می گذارد. هر اتم سیلیکون به همین ترتیب به 4 اتم همسایه متصل می شود. وقتی انرژی به اتم های سیلیکون خالص می رسد - مثلاً از طریق گرما یا تابش - موجب می شود پیوند تعدادی از الکترون ها در اتم سیلیکون شکسته شود و حفره ایجاد شود. الکترون های آزاد شده، پیرامون شبکه ی بلوری پراکنده می شوند و به سمت حفره های دیگر جذب می شوند. این الکترون ها «حامل های آزاد» نامیده می شوند. در سیلیکون



ناخالص – مثلاً در ترکیب با اتم های فسفر- انرژی بسیار کمتری برای ضربه زدن به الکترون های لایه ی آخر اتم سیلیکون لازم است؛ زیرا آن ها در پیوند با اتم های همسایه مقید نشده اند. بنابراین الکترون های آزاد بیشتری به وجود می آیند و نسبت به سیلیکون خالص حامل های آزاد بیشتری ایجاد می شود.<sup>[16]</sup> اضافه کردن ناخالصی را «ناخالص سازی» می گویند. سیلیکون به دست آمده به دلیل پخش الکترون های آزاد، نوع n نامیده می شود. سیلیکون ناخالص شده ی نوع n رسانای بسیار بهتری نسبت به سیلیکون خالص است. البته فقط بخشی از یک سلول خورشیدی سیلیکون ناخالص شده ی نوع n است. سایر قسمت های سلول با بور<sup>1</sup> ناخالص سازی می شود که فقط 3 الکترون در لایه بیرونی خود دارد. به این ترتیب سیلیکون به جای داشتن الکترون های آزاد دارای حفره های آزاد میشود و به آن سیلیکون آلائیده ی نوع p می گویند.

## 2-5-2 ساختار فیزیکی<sup>[2]</sup>

یک پنل خورشیدی از یک ماده نیمه رسانا تشکیل شده است که از طریق ترکیب های سیلیکون میتواند انرژی تابشی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند. وقتی نور به یک ماده برخورد میکند یا بازتاب داده میشود یا عبور میکند یا جذب آن ماده میشود. پنل خورشیدی با جذب فوتون های نور باعث میشود تا الکترون و حفره های اضافه در سطح ماده تولید شود و سپس از طریق جریان الکترون های اضافی برق تولید کند. برای آنکه یک فوتون جذب شود باید انرژی آن از انرژی Bandgap نیمه رسانا بیشتر باشد. به هر حال هر چه این انرژی به سطح انرژی Bandgap نیمه رسانا نزدیک تر باشد انرژی بیشتری جذب میشود و تلفات انرژی کمتری خواهیم داشت. گرمای اضافی باعث افزایش مقاومت نیمه رسانا میشود و باعث میشود الکترون ها به انرژی بیشتری برای عبور از باند ظرفیت<sup>2</sup> نیاز داشته باشند و در نتیجه توان خروجی کاهش میابد.

## 2-5-2 مشخصه درونی

جریان الکترون ها با انرژی تابشی جذب شده توسط پنل رابطه ی مستقیم دارد. هرگاه انرژی فوتون ها در اثر کاهش نور، از انرژی شکستن Bandgap کمتر باشد، جریان الکترون ها نیز متناسب با آن کاهش میابد. معادله زیر جریان خروجی یک سلول خورشیدی و نیز چگونگی رابطه ی این جریان با ولتاژ و دما را نشان میدهد. جریان سلول به انرژی موجود در فوتون ها،  $I_1$  و

<sup>1</sup> Bohr  
<sup>2</sup> valence bond

جریان اشباع دیود،  $I_0$  وابسته است. معادله 2-7 ولتاژ سلول را به عنوان تابعی از جریان آن و نیز فوتوکارنت<sup>1</sup> ها ( $I_{PH}$ ) نشان میدهد.

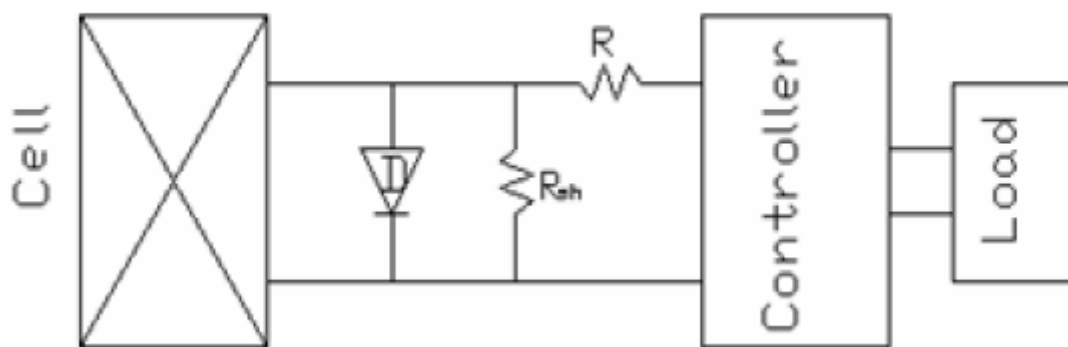
$$I = I_1 - I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (5-)$$

$$q = 1.6 * 10^{-19} \quad (coloumb) \quad (6-)$$

$$K = 1.38 * 10^{-23} \quad \left( \frac{J}{K} \right)$$

$$V = 0.0731 \ln \left( \frac{I_{PH} - I + 0.0005}{0.0005} \right) - 0.05 * I \quad (V) \quad (7-)$$

در معادله ی (2-5)  $I_0$  جریان اشباع دیود است و  $q$  بار الکترون است و مقدار آن در (2-6) آمده است.  $K$  یک پارامتر ثابت است و مقدار و واحد آن در (2-7) نشان داده شده است.  $V$  ولتاژ به دست آمده از سلول است. و  $T$  مقدار دما بر حسب کلوین می باشد. شکل 2-2 طرح یک سلول خورشیدی را نشان میدهد که شامل یک نیمه رسانا به عنوان منبع تولید توان الکتریکی است و یک مقاومت که با مقاومت پنل خورشیدی موازی شده است. یک دیود و یک مقاومت برای مدل سازی مقاومت بین سیم های داخل سلول نیز در نظر گرفته شده است. دیود مانع میشود که جریان بایاس معکوس در طول شب باعث تخلیه ی ذخیره سازهای سیستم شود. مقاومت های داخلی پنل نیز با دو مقاومت سری و موازی نشان داده شده است. مقاومت موازی، بسیار بزرگ و مقاومت سری، بسیار کوچک است. این مقاومت ها تاثیر اندکی بر کارکرد سلول دارند. کنترلر، بسته به نوع بار، میتواند یک MPPT یا مبدل DC باشد. نوع ترکیب سیلیکون، تعیین کننده ی آن است که چه طول موجی و تحت چه میزانی از انرژی جذب پنل خورشیدی شود. فوتون هایی که میزان انرژی آنها از انرژی Bandgap سیلیکون بیشتر است از پنل خورشیدی عبور میکنند.



شکل 2-2 - مدار معادل یک پنل خورشیدی<sup>[2]</sup>

#### 2-5-2-3 انواع مواد فتوولتاییک<sup>[2]</sup>

انواع اصلی مواد فتوولتاییک عبارتند از پلی کریستالین سیلیکون<sup>1</sup>، مونوکریستالین سیلیکون<sup>2</sup> و آمورفوس سیلیکون<sup>3</sup>. ایجاد یک پیوند PN نیاز به افزودن ناخالصی به اتم های سیلیکون دارد. فسفر<sup>4</sup> و بورن<sup>5</sup> به عنوان ناخالصی غالب ترکیبات استفاده میشوند. بازده پنل خورشیدی درصد انرژی تابشی خورشیدی جذب شده توسط پنل که به توان الکتریکی تبدیل شده، می باشد. پس بالا بودن بازده به معنای آن است که از میزان معین نور جذب شده توسط پنل خورشیدی، توان بیشتری تحویل داده می شود. مونوکریستالین از ترکیب چند سیلیکون تک کریستالی به یک بلوک کریستالی بزرگ تشکیل شده است. این ترکیب قیمت بالایی دارد و از طرفی بازده بالایی حدود 17 % دارد. پلی کریستالین نیز به همین طریق ساخته می شود ولی از کریستال های چندتایی برای ساختن ترکیب در آن استفاده می شود. این روند هزینه ساخت سلول را کاهش می دهد ولی بازده آن نیز تا حدود 13 % کاهش میابد. سلول خورشیدی ساخته شده از آمورفوس لایه ی نازکی است که دارای ابعاد دراز و طویل می باشد. آمورفوس ارزان ترین نوع ماده ی فتوولتاییک است و سریع تر از دیگر انواع آن نیز ساخته می شود. ولی بازده آن بسیار کمتر از انواع دیگر - حداکثر 5 % - است

#### 2-5-2-4 مزایای سلول های فتوولتاییک

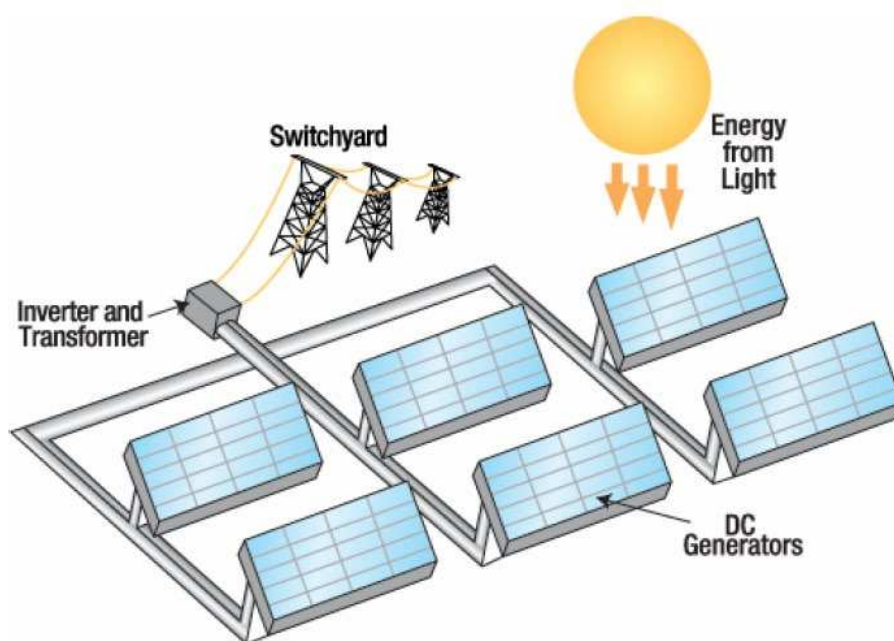
1- یک سیستم غیرمکانیکی است و معایب سیستم های مکانیکی را ندارد.

<sup>1</sup> Polycrystalline Silicon  
<sup>2</sup> Monocrystalline Silicon  
<sup>3</sup> Amorphous Silicon  
<sup>4</sup> Phosphorous  
<sup>5</sup> Boron

- 2- چون تبدیل انرژی خورشید به برق به صورت مستقیم انجام می شود به ژنراتور، توربین و تجهیزات مربوط به آن نیاز نیست.
- 3- قابلیت نصب و راه اندازی سریع برای تولید هر توانی وجود دارد.
- 4- نیاز به آب یا سیال واسطه ندارند و ضایعاتی به همراه ندارند.
- 5- عمر مفید طولانی دارند.
- 6- به تعمیر و نگهداری اندکی نیاز دارند.

#### 5-2-5-2 معایب نیروگاههای سلول نوری

- 1- بازده نسبتاً کمی دارند.
- 2- هزینه های سرمایه گذاری سیستم فتوولتائیک در مقایسه با روش های دیگر بسیار زیاد است.
- 3- ساعت کارکرد با تمام ظرفیت در طول سال محدود است.
- 4- پیوند با سیستم پشتیبان سوخت فسیلی ناممکن است. سلولهای نوری نیاز به یک سیستم مجزای پشتیبان یا برق شبکه برای جبران نوسان های انرژی خورشید را دارند.
- 5- ذخیره سازی با باتریهای الکتروشیمیایی برای این شیوه تولید بسیارگران قیمت است.
- 6- جریان تولیدی توسط این سلول ها مستقیم<sup>1</sup> است؛ پس وقتی این سلول ها برای مصارف تجاری مورد استفاده قرار می گیرند یا در وسایلی که نیاز به جریان متناوب دارند باید آنها را با یک مبدل یا با ادوات حالت جامد به برق متناوب با فرکانس شبکه تبدیل کرد.



<sup>1</sup> Direct Current

## شکل 2- 3- دیاگرام یک نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک<sup>[29]</sup>

جدول 2- 2- انواع مواد ساختاری سلول ها و بازده آنها

بازده ی آزمایش عملی	بازده تئوری		نوع
	بازده %	مساحت (cm2)	
23	29	4	مونی کریستالین سیلیکون (Si)
18		4	پولی کریستالین سیلیکون (Si)
12	27	1	آمورفس سیلیکون (a-Si)
26	31	0.25	گالیم آرسناید (GaAs)
17	27	3.5	کوپر ایندیم سلناید (CIS)
16	31	1	کادمیم تلوراید (CdTe)

(اصلاحیه: جدول در یک صفحه)

### 2-5-2-6 نیروگاه بزرگ PV جهان

- 1- Olmedilla Photovoltaic Park : اسپانیا، بزرگترین نیروگاه سلول نوری درجهان، در آن 162000 پنل مسطح برای تولید 60 مگاوات برق به رفته است.
- 2- The Strasskirchen Solar Park : آلمان، ظرفیت نصب آن 54 مگاوات است.
- 3- The Lieberose Photovoltaic Park : آلمان، با 700 هزار پنل خورشیدی و تولید 53 مگاوات که در سال 2009 به طور کامل به شبکه وصل شد و در حال حاضر برق 15000 خانوار را تأمین می کند.
- 4- Puertollano PV Park : اسپانیا، با ظرفیت نامی 47/6 مگاوات که برای مصارف خانگی و محلی 39000 خانوار به کار می رود.
- 5- Moura Photovoltaic Power Station : پرتقال، ظرفیت نصب آن 46 مگاوات است و حدود 376000 پنل خورشیدی در ساخت آن به کار رفته است.



شکل 2-1 - نیروگاه PV اولمدیلا، اسپانیا

## 2-3-5 نیروگاههای کلکتور خورشیدی<sup>[1]</sup>

کلکتورها انرژی موجود در امواج الکترومغناطیس خورشید را به گرما تبدیل می کنند که غالباً برای گرم کردن یک مایع - سیال سیستم- استفاده می شود. این نیروگاهها به دو دسته ی کلی طبقه بندی می شوند: نیروگاه های متمرکز کننده ی توان خورشیدی و نیروگاههای بدون متمرکز کننده ی توان خورشیدی.

### 2-3-5-1 غیرمتمرکز کنند های توان خورشیدی

این نوع نیروگاهها عموماً برای تولید توان حرارتی استفاده می شوند. مساحتِ جاذبِ انرژی تابشی خورشیدی، بدون متمرکزکننده در برابر تابش خورشید قرار می گیرد. عدم استفاده از متمرکز کننده در این سیستم ها باعث می شود مدل ساده تری داشته باشیم که احتمال خطای کمتری دارد ولی منجر به کاهش بازده نیروگاه نیز می شود.



## 2-3-5-2 نیروگاههای خورشیدی با متمرکزکننده

این نوع نیروگاه ها از ابزارهایی مثل لنز یا آینه برای متمرکز کردن سطح وسیع دریافت اشعه ی خورشید بر روی یک ناحیه ی کوچک استفاده می کنند.

از این گرمای متمرکز شده برای داغ کردن یک مایع خاص – سیال سیستم – استفاده می شود. سیال داغ شده در چرخه ی نیروگاه برای تولید برق به کار می رود؛ به این ترتیب که این سیال داغ بخار می شود و تحت فشار، یک توربین بخاری حرارتی را می چرخاند که به یک ژنراتور متصل است تا برق تولید کند.

امروزه چهار نوع از تکنولوژی متمرکز کننده های خورشیدی وجود دارد: سهموی گون، بشقابی – استرلینگ، متمرکزکننده های خطی فرسnel و برج های خورشیدی.

هریک از این نوع نیروگاه ها بر اساس عملکرد و ساختار، مزایا و معایبی دارند و از طرفی تفاوت هایی با یکدیگر در شیوه ی متمرکز کردن اشعه ی خورشید دارند.

## 2-3-5-2 ناودان های سهموی گون<sup>[1]</sup>



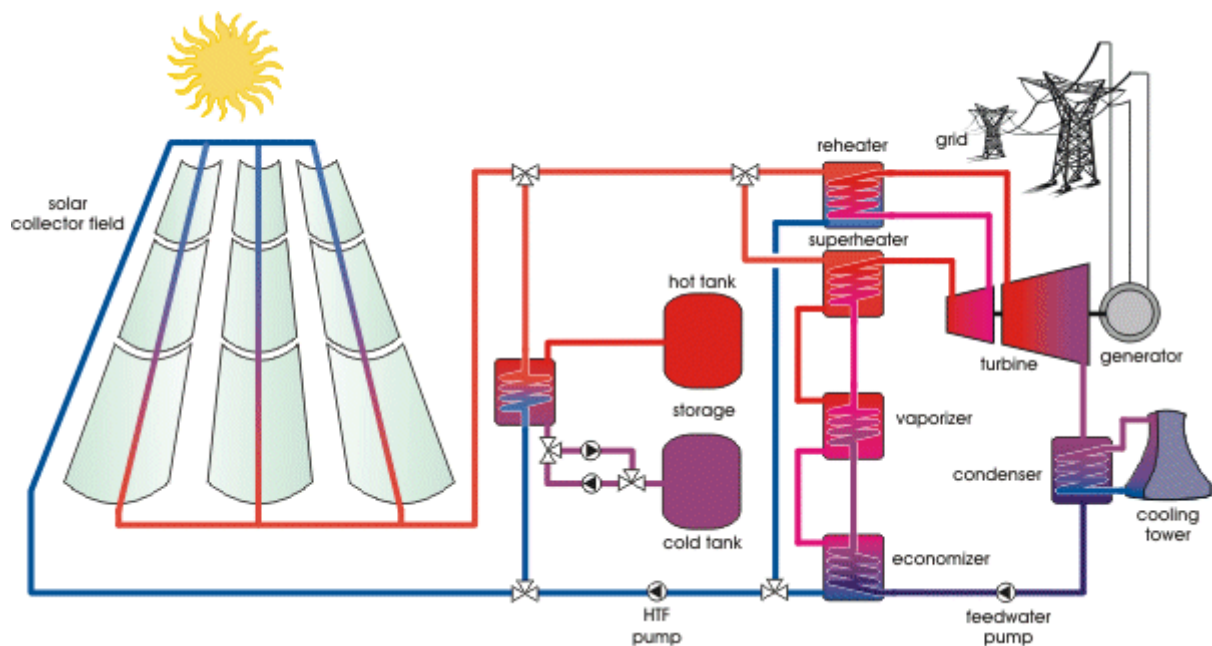
شکل 2- 4- ناودان های سهموی گون

متمرکزکننده های این نیروگاهها نور خورشید را در یک خط راست در کانون سهمی متمرکز میکنند. در محل تمرکز نور خورشید، یک لوله ی جاذب قرار دارد. سیال جاذب حرارت، داخل

<sup>1</sup>Parabolic Trough



این لوله ها جریان دارد و گرم میشود و بعد از گرم شدن به مولد بخار<sup>1</sup> (شامل پیش گرم کن و دیگ بخار و فوق گرم کن) پمپ می شود. برای کاهش انتقال حرارت، لوله ی جاذب داخل یک پوشش شیشه ای که داخل آن خلأ شده است قرار میگیرد. برای زمان هایی که تابش خورشید کافی نیست و نیز برای اجتناب از راه اندازی مجدد مولد بخار به طور روزانه، از یک محفظه ی احتراق با سوخت گاز طبیعی در این نیروگاه استفاده میشود. برای رعایت مسایل زیست محیطی این محفظه ی احتراق حداکثر 25 % حرارت ورودی در حال کارکرد ظرفیت اسمی مولد بخار را تامین میکند. مطالعات در زمینه این نیروگاهها بسیار پیشرفت کرده است. در حال حاضر 9 نیروگاه به ظرفیت اسمی 354 مگاوات در کالیفرنیا جنوبی بصورت تجاری راه اندازی شده است. در کشور خودمان نیز یک واحد 500 کیلوواتی از این نوع نیروگاه با همکاری دانشگاه شیراز و وزارت نیرو به مرحله ی بهره برداری رسیده است.



شکل 2- 5- شماتیک یک نیروگاه سهموی گون

برای کاهش هزینه ی تمام شده و نیز افزایش کارایی این نیروگاهها تحقیقات بسیاری انجام شده و پیشرفت های قابل توجهی حاصل شده است. مهمترین این پیشرفتها به شرح زیر است:

- 1- استفاده از متمرکزکننده های سهموی ناودانی در بخش دیگ بخار نیروگاههای سیکل ترکیبی.

<sup>1</sup> Steam Generator

2- تولید بخار در لوله های جاذب در متمرکز کننده های سهموی ناودانی بصورت مستقیم که باعث حذف مبدل حرارتی در سیستم میشود. از طرفی سیستم کنترلی نیروگاه نیز بسیار ساده تر می شود.

متمرکز کننده های ناودانی معمولاً حول یک محور گردش می کنند و به تعقیب خورشید<sup>1</sup> می پردازند. این محور افقی میتواند در راستای شرقی-غربی یا شمالی-جنوبی باشد. تجربه و محاسبات نشان داده است اگرچه راستای شرقی غربی باعث جذب بیشتر تابش هنگام ظهر در گیرنده میشود ولی گیرنده های با محور شمالی-جنوبی در مجموع در جذب تابش در طول روز بهتر عمل میکنند. یعنی میزان بیشتری انرژی در طول روز دریافت می کنند. برای کنترل متمرکز کننده ها در طول روز به منظور تعقیب خورشید میتوان از سیستم های کنترلی فعال<sup>2</sup> و غیر فعال<sup>3</sup> استفاده کرد. در سیستم های غیر فعال باید مسیر حرکت خورشید را در طول روز پیشاپیش مشخص کرد و متمرکز کننده را بر اساس آن محاسبات به حرکت در آورد. در سیستم های کنترل فعال تعقیب خورشید توسط دو سنسور حساس نوری انجام میشود. هرگاه مسیر رسیدن تابش خورشید، در اثر تغییر مکان خورشید به این دو سنسور تغییر کند سیستم کنترل، متمرکز کننده را در جهت رفع این حالت نامتعادل می چرخاند. دقت این سنسور ها در حدود 0.5 درجه است. این سیستم ها معمولاً با یک ذخیره کننده ی انرژی برای ذخیره ی گرما همراه هستند که در آن نمک مذاب به کار رفته است.

تأسیسات تولید برق توسط آئینه های سهمی گون با ظرفیت های بین 30 تا 150 مگاوات طراحی میشوند. دریافت کننده های خورشیدی شامل چند ردیف از آئینه های سهمی شکل با سطح مقطع سهمی گون هستند که نور خورشید را به نقطه کانونی آئینه باز می تابانند. در نقطه کانونی لوله سیاه جاذب گرما نصب شده است. این سیستم با نور مستقیم خورشید کار میکند و از نور پراکنده استفاده نمیکند. یک سیستم تک محوره ی خودکار آفتابگردان سبب میشود که لوله جاذب در تمام طول روز در نقطه کانونی آینه ها قرار بگیرد. سیال داغ - که معمولاً روغن مصنوعی است - به سمت مبدل گرمایی و تبخیرکننده یک چرخه رانکین<sup>4</sup> برای تولید بخار پمپ می شود. نوسانهای ناشی از کاهش انرژی تابشی، توسط یک سیستم پشتیبان سوخت فسیلی قابل جبران است. این سیستم پشتیبان شامل گرم کننده و یک دیگ بخار با سوخت فسیلی است. سیستم پشتیبان به ویژه

---

Sun tracking<sup>1</sup>  
Active Control Systems<sup>2</sup>  
Passive Control Systems<sup>3</sup>  
Rankin Cycle<sup>4</sup>

هنگامی اهمیت پیدا می کند که ضریب بازده و قابلیت دسترسی بالا مورد نیاز باشد که معمولاً در نیروگاههایی با توان تولیدی چند مگاوات مورد نظر است. فقط از گاز طبیعی به عنوان سوخت سیستم پشتیبان استفاده می شود؛ زیرا با این سوخت پاسخ سریعتری به نوسانات تولید داده می شود. یک سیستم ذخیره گرمایی نیز به عنوان سیستم پشتیبان دوم در نیروگاه نصب می شود. درجدول 2-4 تعدادی از طرحهای تولید برق با شیوه آئینه های سهمی گون در جهان نشان داده شده است.

مزایای روش تولید برق توسط ناودان های سهموی گون عبارت است از:

- 1- پیوند ساده با سیستم پشتیبان با سوخت گازطبیعی.
- 2- توان تولید بالا (بیش از 94 درصد)
- 3- امکان تولید انبوه قطعات خورشیدی مشابه.
- 4- امکان تولید گرما و برق همزمان.

جدول 2-3 نمونه هایی از سیستم "SEGS" که در دنیا نصب شده است

نام و مکان	توان [MW]	نوع کارکرد	زمان اتصال به شبکه
کولیدیچ، آمریکا	0.15	خورشیدی	1980-1982
آفتاب، ژاپن	1	خورشیدی	1981-1984
Step-100، استرالیا	0.1	خورشیدی	1981-1985
SEGI، آمریکا	14	پیوندی خورشیدی-فسیلی	1982-1985
SEGII، آمریکا	30	پیوندی خورشیدی-فسیلی	1985
SEGI-III-IV، آمریکا	30	پیوندی خورشیدی-فسیلی	1986
SEGV، آمریکا	30	پیوندی خورشیدی-فسیلی	1987
SEGV.II.VII، آمریکا	30	پیوندی خورشیدی-فسیلی	1988
SEGVII، آمریکا	80	پیوندی خورشیدی-فسیلی	1989
SEGIX، آمریکا	80	پیوندی خورشیدی-فسیلی	1990
IEA-DCS، اسپانیا	0.5	خورشیدی	1991

## (اصلاحیه: نوشته شود ادامه جدول 3-2)

معایب روش تولید برق توسط ناودان های سهموی گون عبارت است از:

- 1- دمای کارکرد بخش خورشیدی به 400 درجه محدود می شود.
- 2- دمای بخار تولید شده با انرژی خورشید به 370 درجه محدود می شود. (دمای بخار تولیدی با سوخت فسیلی 550 درجه است، بنابر این بازده چرخه بخار در تبدیل انرژی خورشیدی و سیستم پشتیبان فسیلی نسبتاً کم است.)
- 3- برای آینه های متمرکز کننده به پایه های صلب و پایدار نیاز می باشد که باعث افزایش هزینه ی احداث نیروگاه می شود.
- 4- دنبال کننده های تک محوری به دلیل عدم دقت کافی در تنظیم زاویه ی سطح دریافت متمرکزکننده با زاویه ی تابش خورشید بخش زیادی از انرژی خورشیدی را از دست می دهند.
- 5- برای تمیزکاری و سرمایش این نوع نیروگاه ها به آب نیاز است.



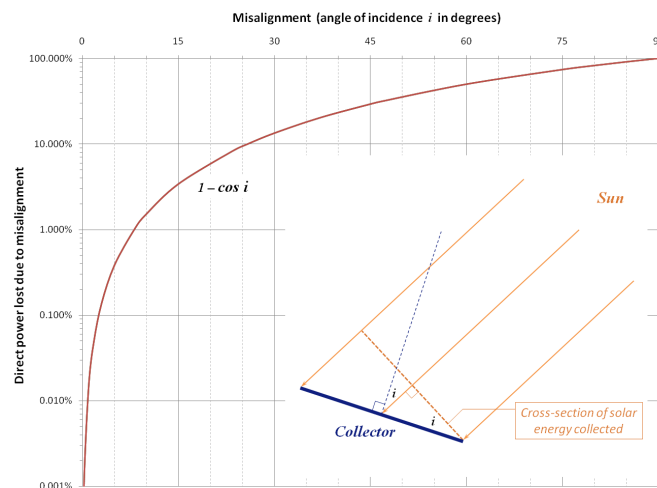
شکل 2-6- دیش استرلینگ های دمیرا، اسپانیا

متمرکز کننده های بشقابی تابش خورشید را معمولا در ناحیه ی کوچکی (کانون سهمی) متمرکز میکنند. برای داشتن ضریب تمرکز بیشتر و رسیدن به درجه حرارت های بالاتر این متمرکز کننده ها معمولا از یک موتور هوای گرم (مانند موتور استرلینگ یا برایتون) ساخته می شوند. در شکل 2-6 مجموعه یک متمرکز کننده ی بشقابی همراه یک موتور استرلینگ واقع در کانون آن نشان داده شده است. این مجموعه یک نیروگاه کوچک است که میتواند به صورت مستقل برای برق رسانی های مستقل از شبکه و برای مصارف کم بهره برداری شود. به دلیل همراهی متمرکزکننده های بشقابی با موتورهای حرارتی آن ها را نیروگاه های بشقابی-موتور<sup>2</sup> نام گذاری کرده اند. در این نیروگاهها استفاده از سوخت جایگزین (مانند گاز طبیعی) در موتور حرارتی امکان پذیر است.

در حال حاضر این نوع نیروگاه ها با ظرفیت های تولید 7.5 مگاوات در اروپا و آمریکا برای استفاده در مناطق دور افتاده و مستقل از شبکه مورد بهره برداری قرار گرفته اند. قطر بشقاب های

Dish Stirling<sup>1</sup>  
Dish-Engine<sup>2</sup>

ساخته شده به حدود 7 متر می رسد. این نوع متمرکز کننده ها برای تعقیب خورشید قابلیت چرخش در دو محور را دارند. برای کنترل این متمرکز کننده ها میتوان از سیستم های کنترل فعال و غیر فعال استفاده کرد. لازم به ذکر است برای استفاده از سیستم کنترلی فعال حداقل به سه سنسور نیاز است. تعداد بالاتر سنسور ها دقت بیشتر را به همراه دارد.



شکل 2- 7 متمرکز کننده خورشیدی [18]

همانطور که در شکل (7-2) نشان داده شده است اگر اختلاف زاویه ی تابش با محور عمود بر سطح دریافت کننده ی خورشیدی را  $i$  بنامیم انرژی تلف شده بر اثر این انحراف در زاویه ی تابش با  $1 - \cos i$  رابطه ی مستقیم خواهد داشت. برای مثال با کاملاً عمود تابیدن خورشید بر سطح دریافت کننده تلفات انرژی حدود 0.001% از انرژی جذب شده است.

در یک متمرکز کننده ی همراه با سیستم کنترلی فعال یک بشقاب سهموی متمرکز کننده وجود دارد که خورشید را تعقیب می کند و انرژی تابشی را در گیرنده ی خود متمرکز می کند. مایع درون گیرنده تا دمای حدود 250-700 درجه گرم می شود. این گرما توسط یک ژنراتور استرلینگ به برق تبدیل می شود. این سیستم بالاترین میزان بازده را در میان انواع متمرکز کننده ها دارد. [1]

در این سیستم متمرکز کننده ی خورشیدی (آینه های مشجمی - بشقابی) و سیستم تبدیل گرما به الکتریسیته (موتور استرلینگ) بر روی یک پایه قرار می گیرند. جاذب حرارتی در این سیستم ها، معمولاً لوله ی جاذب گرمایی است که در کانون آینه قرار گرفته است. جاذب گرما معمولاً با گاز هیدروژن یا هیلوم، خنک می شود. سیستمهای بشقابی استرلینگ کاملاً مشابه یکدیگر هستند و هر یک به تنهایی قادر به تولید 10 تا 50 کیلووات انرژی الکتریکی هستند که با اتصال به یکدیگر

نیروگاهی با توان بیش از یک مگاوات و قابل اتصال به شبکه را ایجاد می کنند. پیوند این نیروگاهها با سیستم پشتیبان سوخت فسیلی امکان پذیر می باشد.

مزایای سیستم تبدیل انرژی بشقابی- استرلینگ عبارت است از:

- 1- به طور مستقل از دیگر واحدها قابل نصب و بهره برداری است.
- 2- دارای نسبت تمرکز، دمای کارکرد و بازده بالاست.
- 3- در مدت طولانی به صورت نیروگاههای کوچک یا واحدهای مستقل کوچک آزمایش شده است.
- 4- امکان تولید مستقل از شبکه برای مناطق دور افتاده وجود دارد.
- 5- امکان تولید انبوه سیستمهای مشابه وجود دارد.
- 6- راهبری، کارکرد، نصب و نگهداری ساده ای دارد.

معایب سیستم تبدیل انرژی بشقابی استرلینگ عبارت است از:

- 1- سیستم پشتیبان سوخت فسیلی- با وجود امکان پذیر بودن- تاکنون ساخته نشده است.
- 2- ساعات تولید توان الکتریکی هماهنگ با ساعات مورد نیاز این انرژی نیست.
- 3- نیاز به پایه های صلب و آفتابگردان در چهار جهت دارد که هزینه نصب نیروگاه را افزایش می دهد.

## 2-3-4 بازتاب دهنده های فرسnel<sup>1</sup>

این سیستم ها از چندین آینه ی مسطح و نازک تشکیل شده اند که نور خورشید را روی یک لوله ی حاوی مایع- سیال سیستم- متمرکز می کنند.

---

<sup>1</sup>Fresnel Reflectors





شکل 2- 8- بازتاب دهنده های فرسنگ

این تکنولوژی با تکنولوژی آینه های سهمی گون دو تفاوت عمده دارد: ساده تر است و قیمت پایین تری دارد؛ از طرفی بازدهی کمتری نیز دارد.<sup>[1]</sup> همانطور که در شکل 8-2 نشان داده شده است لوله ی جاذب گرما، انرژی تابشی را از مجموعه ای از آینه های مسطح دریافت میکند.

#### 2-5-3-5 نیروگاههای برج خورشیدی<sup>1</sup>

سیستم های تبدیل انرژی برج خورشیدی از یک مزرعه آینه ها (به نام هلیوستات<sup>2</sup>) تشکیل شده است که قابلیت چرخش در راستای دو محور را دارند. این آینه ها تابش خورشید را به سمت یک جاذب که در بالای برج مرکزی قرار دارد، باز می تابانند. در این سیستم ها باید خورشید را به صورتی تعقیب کنند که بازتاب نور خورشید به جاذب واقع در بالای برج مرکزی برسد. در جاذب حرارتی، انرژی خورشیدی توسط یک سیال واسطه (هوا یا نمک ذوب شده) جذب میشود.

<sup>1</sup>Solar power Tower  
<sup>2</sup>Heliostat



شکل 2- 9- نیروگاه 5 مگاواتی برج خورشیدی سیرا، کالیفرنیا

این حرارت برای تولید بخار در یک مولد بخار استفاده میشود. برای اینکه مشخصات بخار در زمانی که میزان تابش خورشید تغییر میکند ثابت بماند، معمولاً از دو روش استفاده میشود:

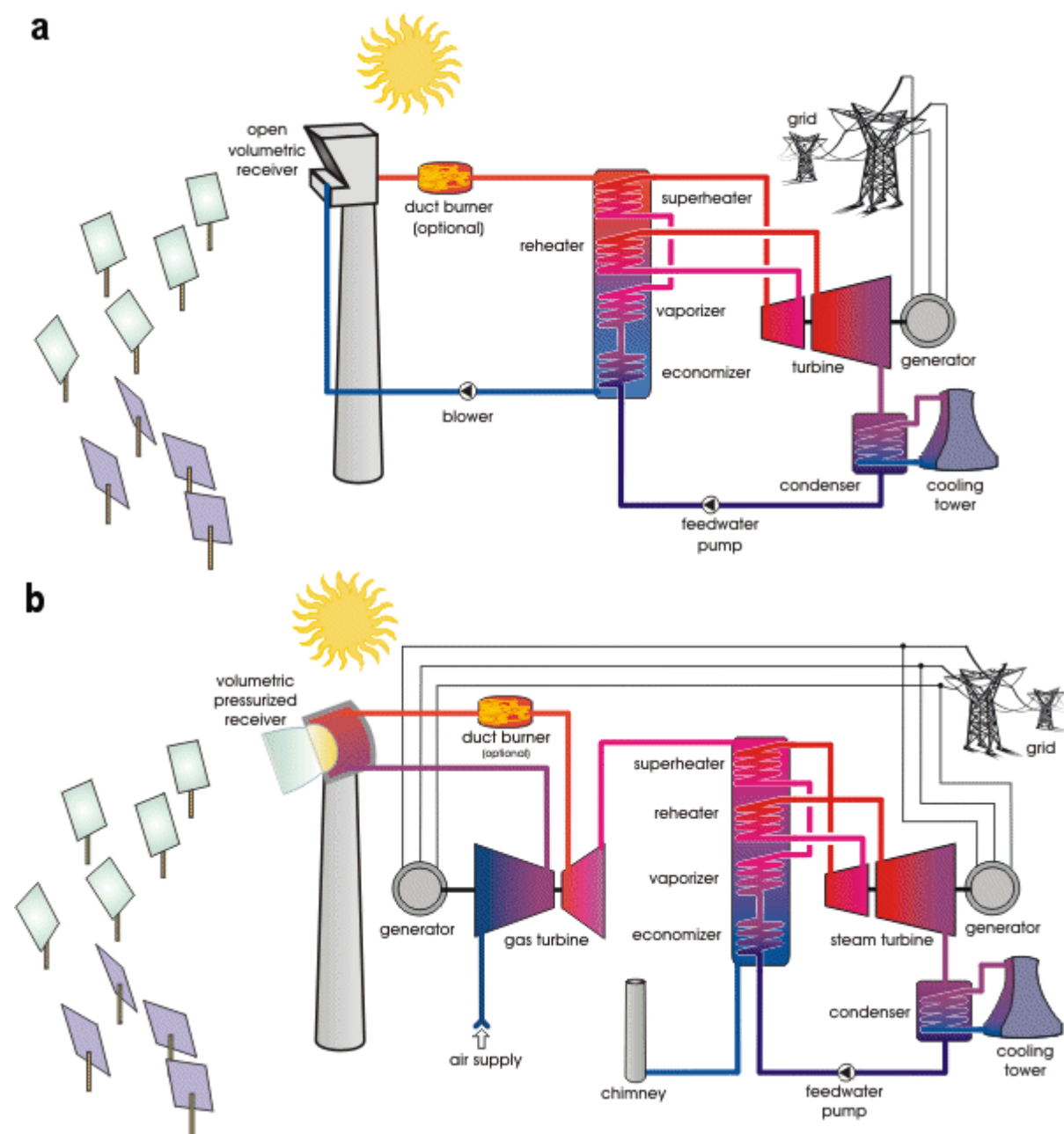
1- استفاده از محفظه احتراق کمکی با سوخت فسیلی.

2- استفاده از یک ذخیره حرارتی به عنوان محافظ سیستم در برابر تغییرات تابش خورشید.

جاذب های حرارتی در این نوع سیستم ها میتوانند بسته به چینه های و دمای مورد نیاز دارای اشکال متفاوتی باشند. از جاذب هایی که در حال حاضر در این سیستم ها استفاده می شوند میتوان به جاذب استوانه ای، جاذب دارای حفره و نیز جاذب های حجمی اشاره کرد. بیشترین بازده و بهترین کارایی مربوط به جاذب های حجمی است. این جاذب ها از مواد متخلخلی<sup>1</sup> ساخته شده اند که کار جذب تابش و انتقال آن به سیال واسطه را انجام می دهند.

<sup>1</sup>Porous Media

برای ذخیره حرارتی میتوان از موادی که در اثر حرارت تغییر فاز میدهند و یا بلوک های سرامیکی استفاده کرد. سیستم های برج خورشیدی برای ظرفیت های 10 مگاوات و بالاتر مورد استفاده قرار میگیرد. دمای سیال واسطه تا 1500 درجه افزایش می یابد.



شکل 2- 10- نیروگاه برج خورشیدی با دو چرخش متفاوت

هرچند متمرکزکننده های خورشیدی یک تکنولوژی تمیز و با رشد سریع است ولی محدودیت هایی نیز دارد:

- 1- نوسانی بودن منبع آن یعنی خورشید اولین مسأله است. این مسأله به شدت از منطقه تا منطقه، فصل به فصل و حتی در ساعات مختلف روز متفاوت است. دلیل این محدودیت چرخش زمین است و بنابراین غیرقابل حل می باشد. با این حال، تکنولوژی های ذخیره کننده های انرژی می توانند اثر این مشکل را تا حد زیادی کاهش دهند.
- 2- اشتعال پذیری سیال کار چرخه؛ در برخی نیروگاههای خورشیدی درجه حرارت روغن وقتی از حد مشخصی بالاتر برود می تواند موجب اشتعال سیال سیستم بشود.
- 3- سمی بودن سیال کار سیستم؛ که برای کارکنان نیروگاه می تواند خطر محسوب شود.
- 4- بازده این نیروگاهها بسیار کم است که این امر دو دلیل عمده دارد؛ اول محدودیت دمای مایع کار و دوم پایین بودن ضریب تمرکز متمرکز کننده های خورشیدی.

#### 2-3-5-6 نیروگاه خورشیدی با متمرکز کننده ی انکساری<sup>[1]</sup>

در این نوع نیروگاه متمرکز کننده ها نور را از طریق شکست منحرف کرده و بر روی جاذب متمرکز میکنند. در اینجا نیز احتیاج به تعقیب خورشید داریم. در واقع یا باید صفحات منکسر کننده را بچرخانیم یا جاذب را به نحوی حرکت دهیم که شکست تابش دائماً بر روی آن قرار گیرد. بر روی این سیستم ها تاکنون مطالعات زیادی صورت نگرفته است و اطلاعات زیادی از آنها در دسترس نیست.

#### 2-3-5-7 نیروگاه خورشیدی با گیرنده مسطح

در این نیروگاهها از گیرنده های مسطح برای بالا بردن دمای سیال عامل استفاده میشود. تکنولوژی مربوط به ساخت گیرنده های مسطح در حال حاضر رشد قابل توجهی داشته است. دلیل این امر استفاده از این گیرنده ها در سیستم های گرمایش ساختمان هاست. با استفاده از گیرنده مسطح معمولی میتوان دمای سیال عامل را به حدود 90 درجه رساند. برای تولید توان الکتریکی میتوان بازده این گیرنده ها و نیز دمای سیال کار سیستم را بالا برد. با استفاده از عایق های حرارتی چند لایه، استفاده از پوشش ویژه<sup>1</sup> در سطح جاذب و استفاده از لوله های جاذب با پوشش شیشه ای دارای خلأ این امر محقق می شود. با روش های فوق میتوان دمای سیال را تا حدود 150 درجه بالا برد.

<sup>1</sup> Selective coating



## 2-5-3-8 نیروگاه خورشیدی با دریافت کننده های مرکزی<sup>[1]</sup>

در این نیروگاهها از آئینه هایی که بر روی تعقیب کننده های دو محوری نور خورشید (آفتابگردان) نصب شده اند، برای تولید برق خورشیدی استفاده می شود. این آئینه ها اشعه آفتاب را به سمت دریافت کننده مرکزی که بر روی برج نصب شده است گسیل می کنند. دریافت کننده های مرکزی با فن آوریهای مختلف آزمایش شده اند. از جمله میتوان به دریافت کننده های لوله ای که مستقیماً بخار تولید می کنند، دریافت کننده های حجم باز هوایی، دریافت کننده های لوله ای با چرخه نمک مذاب و دریافت کننده های لایه نازک اشاره کرد. یک چرخه بخار معمولی برای تبدیل گرما به انرژی الکتریکی از سیال داغ شده توسط دریافت کننده ی مرکزی استفاده میکند. این سیستم اجازه کار کردن با دمای تا 800 درجه سانتیگراد را می دهد که آشکارا بازده چرخه بخار را افزایش می دهد. یک سیستم ذخیره گرمایی برای کاهش اثر تغییرات انرژی خورشیدی ورودی و افزایش انرژی الکتریکی تولید شده هنگام کاهش تابش خورشیدی استفاده می شود. چرخه بخار به ویژه برای افزایش بازده ذخیره گرمایی مناسب است. پیوند یک سیستم پشتیبان با سوخت گاز طبیعی به این نوع نیروگاه های خورشیدی امکانپذیر است. گستره تولید توان این نیروگاهها 30 تا 160 مگاوات است. در جدول 2-5 هشت طرح آزمایشی نیروگاه های دریافت کننده ی مرکزی فهرست شده است. همان طور که در جدول نشان داده شده است بزرگترین نیروگاه از این نوع، نیروگاه «خورشیدی یک» با ظرفیت 10 مگاوات در «بارستو» کالیفرنیاست که دارای دریافت کننده تولید بخار مستقیم است.

جدول 2-4 - سیستمهای آزمایشی دریافت کننده مرکزی

نام و محل نصب	توان (MW)	خنک کننده ی دریافت کننده مرکزی	دوره کارکرد
ارولیوس، ایتالیا	1	بخار آب	1984-1980
آفتاب، ژاپن	1	بخار آب	1984-1981
IEA.CRS، اسپانیا	0.5	سدیم	1985-1981
خورشید 1، آمریکا	10	بخار آب	1988-1982
CESI، اسپانیا	1.2	بخار آب	1984-1983
متیس، فرانسه	2.5	نمک مذاب	1986-1983
MSEE، آمریکا	0.75	نمک مذاب	1985-1984
5SEC، روسیه	5	بخار آب	1989-1985
PHOBEUS، اسپانیا	2.5	هوا	1992 تا کنون
خورشید 2، آمریکا	10	نمک مذاب	1995 تا کنون

مزایای شیوه تبدیل انرژی از نوع دریافت کننده های مرکزی عبارت است از:

- 1- بازده بالا در تبدیل انرژی خورشیدی در مقایسه با انواع دیگر نیروگاه های تبدیل انرژی خورشیدی.
- 2- دمای بالای بخار تولید شده.
- 3- پیوند ساده با یک سیستم پشتیبان گاز طبیعی.
- 4- توان تولید بالا (بیش از 94 درصد).
- 5- امکان تولید انبوه قطعات خورشیدی مشابه.
- 6- تولید بخار برای تولید همزمان گرما و الکتریسیته.

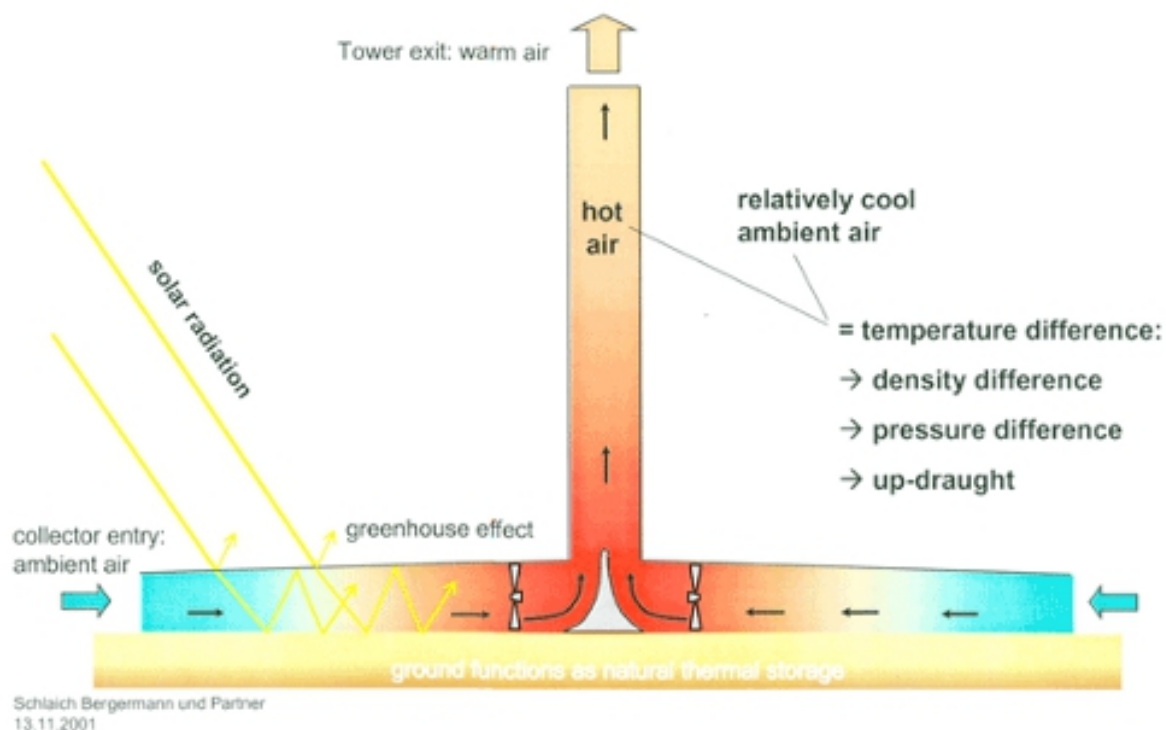
معایب دریافت کننده مرکزی عبارتند از:

- 1- اتلافهای زیاد انرژی گرمایی در چرخه ی بخار.
- 2- انرژی خورشیدی و سیستم پشتیبان سوخت فسیلی با بازده نسبتاً کم در چرخه بخار به الکتریسیته تبدیل می شود.
- 3- برای آئینه ها و سیستم آفتابگردان به پایه های بسیار بادوام نیاز است که باعث افزایش هزینه ی نصب می شود.
- 4- برای تمیز کردن آئینه ها به آب نیاز است.

#### 2-5-4 دودکش خورشیدی

این نیروگاهها از یک گلخانه ی بزرگ خورشیدی و یک دودکش مرکزی تشکیل شده اند. هوا توسط خورشید در زیر یک سقف بزرگ شیشه ای -گیرنده- گرم می شود. در این روش از هر دو تابش پراکنده و مستقیم برای تبدیل انرژی استفاده می شود. هوای گرم ایجاد شده به سمت دودکش، واقع در مرکز گیرنده می رود و در دودکش به سمت بالا جریان پیدا می کند. این جریان هوای بالا رونده، توربین های بادی را که در پایه ی دودکش نصب شده اند به حرکت در می آورد. زمین زیر گلخانه ذخیره کننده ی حرارتی سیستم به شمار می رود. این اثر را می توان با نصب لوله های سیاه حاوی آب در زمین افزایش داد. با این روش می توان ساعات کاری دودکش خورشیدی را تا 24 ساعت افزایش داد. البته هنگام شب نیروگاه با ظرفیت کمتر تبدیل انرژی را انجام می دهد.

هنگامی که یک فضای باز را که تابش قابل توجه خورشیدی دارد با شیشه بپوشانند، دمای خاک و هوای زیر پوشش شیشه ای تقریباً تا 35 درجه سانتیگراد گرمتر از دمای محیط خواهد شد. اگر پوشش شیشه ای، شیب ملایمی از مرکز به سمت کناره ها داشته باشد و در مرکز آن، دودکش تعبیه شود، هوای گرم به سمت دودکش کشیده شده و داخل دودکش جریانی از هوا با سرعت تقریبی 15 متر بر ثانیه ایجاد می شود. با نصب یک توربین بادی افقی محور در ورودی دودکش، از جریان هوای ایجاد شده برای تولید برق، استفاده می شود. این نوع نیروگاه های خورشیدی از تشعشع های پراکنده و مستقیم خورشید برای تبدیل انرژی استفاده می کند. از خاک زیر پوشش شیشه ای، به عنوان ذخیره ساز گرما برای چند ساعت کارکرد نیروگاه بعد از غروب خورشید استفاده می شود. روش تولید برق دودکش خورشیدی برای ظرفیتهای 30 تا 100 کیلووات طراحی شده است. با پشتیبانی و مسئولیت دولت آلمان و همکاری شرکت توزیع برق اسپانیا، اولین نیروگاه آزمایشگاهی از نوع دودکش خورشیدی با ظرفیت 50 کیلووات در سالهای 1981 تا 1982 در مانزاین اسپانیا نصب شد. دودکش این نیروگاه 20 متر ارتفاع داشت و سطح کلکتور نیروگاه 45 هزار متر مربع بود. این نیروگاه در سالهای 1986 تا 1989 به شبکه متصل شد. در سال 1989 نیروگاه 3157 ساعت کار کرد که شامل 244 ساعت کار در شب بود.



جدول 2-2- عملکرد یک دودکش خورشیدی

## 2-5-4-1 مزایای روش تولید برق دودکش خورشیدی:

- 1- امکان استفاده از تشعشع پراکنده و مستقیم خورشید برای سیستم وجود دارد.
- 2- خاک زیر شیشه به عنوان ذخیره گرمایی عمل می کند. بنابراین از تغییرات شدید در انرژی الکتریکی تولید شده جلوگیری می کند.
- 3- برای ساخت نیروگاه به مصالح ارزان قیمت که به سادگی در دسترس اند نیاز است.
- 4- عملکرد نیروگاه به سادگی توسط یک سیستم کامپیوتری قابل کنترل است.
- 5- در این روش برای تعمیر و نگه داری به آب نیاز نیست.

## 2-5-4-2 معایب روش تولید برق دودکش خورشیدی:

- 1- بازده تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته بسیار کم است.
- 2- پیوند با سیستم پشتیبان سوخت فسیلی ناممکن است.
- 3- ساعات کامل کارکرد سالانه به 2500 ساعت محدود می شود.
- 4- مساحت زمین مورد نیاز برای ساخت دودکش بسیار زیاد است.
- 5- برای توانهای تولید بالا به دودکش بسیار بلندی نیاز است. برای مثال برای تولید 30 مگاوات نیاز به دودکش با ارتفاع 750 متر داریم.

## 2-6 انباشت و ذخیره ی انرژی

### 2-6-1 انرژی خورشیدی در شب

ذخیره سازهای مختلفی برای ذخیره ی انرژی گرمایی ساخته شده اند. برای مثال می توان به سیستم های جرم گرمایی<sup>1</sup>، مواد تغییردهنده ی فاز<sup>2</sup>، باتری های شارژ شونده<sup>3</sup>، ذخیره کننده های دمای بالای نمک مذاب و ذخیره کننده های پمپی هیدروالکتریسیته<sup>4</sup> که هنگام افزایش بیش از حد میانگین انرژی، آب را از سطح پایین سد به بالای آن پمپاژ می کنند و سپس هنگام کاهش در تولید انرژی می توانند با استفاده از یک ژنراتور هیدروالکتریک برق تولید کنند.

ذخیره کننده های حاوی نمک مذاب بهترین نوع از ذخیره کننده های انرژی خورشیدی هستند. به این دلیل که گرمای ویژه ی نمک بسیار بالاست و قیمت آن نیز بسیار کم است. از طرفی می تواند زمان قابل توجهی در دمای بالا باقی بماند که برای مثال در یک نیروگاه 50 مگاواتی سیستم پشتیبان خوبی به شمار می رود.

- 
- 1 Thermal mass systems
  - 2 Phase change materials
  - 3 Rechargeable batteries
  - 4 Pumped storage Hydroelectricity



به طور کلی دو روش برای استفاده از یک ذخیره کننده ی انرژی وجود دارد. روش اول سیستم های مستقیم است که از همان مایعی که در چرخه استفاده می شود برای انتقال گرما به ذخیره کننده استفاده می کنند. روش دوم سیستم های غیرمستقیم است که توسط یک سیال واسطه که در یک مبادله کننده حرارتی گرما را از سیال سیستم می گیرد انرژی گرمایی را به ذخیره کننده انتقال می دهند.

سیستم های غیرمستقیم بر مبنای عملکرد مبادله کننده های حرارتی کار می کنند. سیال کار چرخه ی نیروگاه با نمک مذاب سرد شده در مبادله کننده های حرارتی<sup>1</sup> تبادل گرما می کنند. نمک مذاب گرم شده سپس در یک تانک انباشته می شود و وقتی نیاز به انرژی در غیاب خورشید باشد، نمک مذاب به مبادله کننده های حرارتی انتقال داده می شود تا انرژی گرمایی خود را به سیال کار چرخه ی نیروگاه انتقال دهد.

#### 2-6-2 روش تولید برق استخر خورشیدی:

یک استخر خورشیدی مخزن بزرگ ذخیره ی آب نمک به غلظتهای متغیر و کف سیاه رنگ است که اشعه ی مستقیم یا پراکنده خورشید را جذب و توسط آن آب را گرم می کند. به منظور کاهش اتلاف انرژی گرمایی ذخیره شده در لایه های سطحی، استخر به 3 ناحیه با غلظتهای مختلف از نمک تقسیم می شود که عبارتند از:

الف) یک ناحیه باریک و با ضخامت کم که در لایه ی بالایی استخر قرار دارد و دارای غلظت کم نمک می باشد. انتقال گرما از این لایه توسط باد و همرفت سطحی انجام می گیرد.

ب) یک ناحیه بدون انتقال گرما به عمق 1 تا 1.5 متر که هر چه به سمت عمق می رود غلظت نمک آن بیشتر می شود. تغییر غلظت نمک باعث می شود که لایه های گرمتر ترکیب نمک به سمت بالا حرکت نکنند. از این رو، این لایه مانند یک عایق شفاف عمل می کند یعنی به اشعه خورشید اجازه عبور به سمت لایه های پایین تر را می دهد ولی از انتقال گرما به سمت بالا جلوگیری می کند.

ج) لایه زیرین استخر که دارای عمق بین 2 تا 4 متر است و غلظت بالای نمک تا حد اشباع دارد. وزن مخصوص آب در این قسمت بسیار بالاست بنابراین هنگامی که انرژی گرمایی جذب می کند به سمت بالای استخر حرکت نمی کند. غلظت نمک در این لایه یکنواخت است. بنابراین به دلیل انتقال گرمای جابجایی، دمای همه ی نقاط این لایه، تعیین کننده میزان ظرفیت ذخیره گرمایی استخر است.

<sup>1</sup>Heat Exchanger

به دلیل این ساختار لایه بندی در استخر خورشیدی، حتی اگر دمای لایه پایینی استخر به صفر درجه و یا بیشتر برسد، دمای لایه بالایی استخر بسیار پایین تر است. آب لایه زیرین به سمت یک مبادله کننده گرمایی پمپ می شود. این مبادله کننده گرمایی به عنوان تبخیرکننده یک ماده آلی عمل می کند که سیال یک چرخه رانکین است. دمای پایین نقطه جوش سیال آلی در گردش، این امکان را فراهم می کند که چرخه رانکین در دمای 100 درجه سانتیگراد کار کند. بازده تبدیل چرخه رانکین با این سیال به 8 % می رسد.

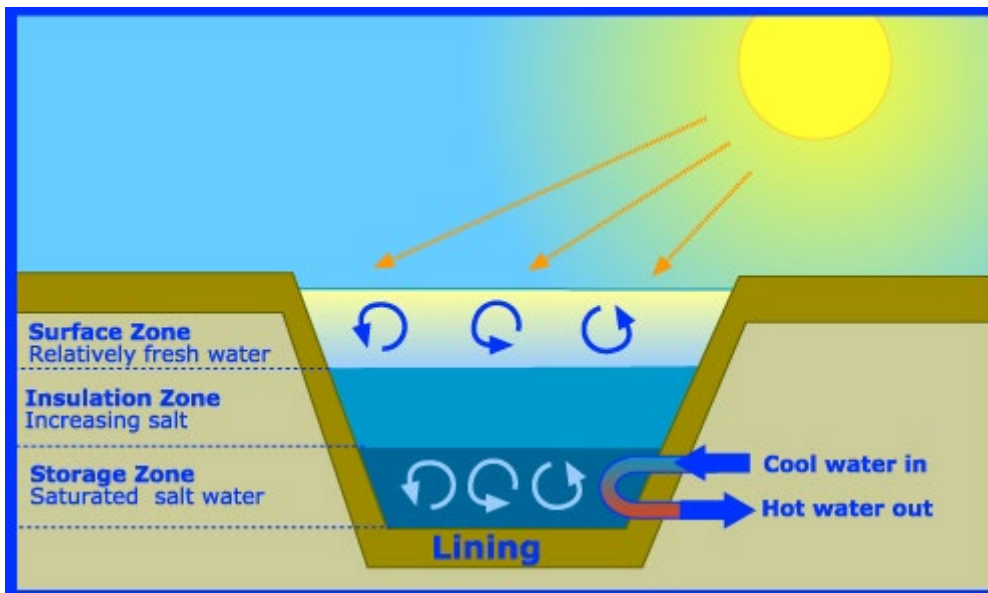
## 2-6-2 مزایای روش تبدیل انرژی استخر خورشیدی:

- 1- در این روش، اساساً با ذخیره ی انرژی گرمایی تبدیل انرژی انجام می شود و نیازی به ذخیره ساز جداگانه برای سیستم پشتیبان ندارد.
- 2- برای تولید برق از انرژی خورشیدی در مواقع بیشینه ی بار مناسب است.
- 3- برای تولید همزمان الکتریسیته و گرما مناسب است.

## 2-6-3 معایب روش تبدیل انرژی استخر خورشیدی:

- 1- بازده تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته بسیار پایین است.
- 2- مساحت وسیعی از زمین مورد نیاز است.
- 3- مقادیر قابل ملاحظه ای آب و نمک با کیفیت خوب مورد نیاز است.
- 4- تثبیت لایه های با غلظت متغیر نمک در نواحی مختلف استخر دشوار است.
- 5- تعمیر و نگهداری سیستم لوله کشی غوطه ور در استخر دشوار است.
- 6- دوره ساخت و راه اندازی برای استخرهای بزرگ بسیار طولانی است.

میتوان از طریق ایجاد گرادیان میزان غلظت نمک ( یا هر محلول دیگری) در آب یک حوضچه در راستای عمودی، جریان همرفت را در داخل آن حوضچه کنترل کرد. در استخرها لایه های پایینی دارای غلظت بیشتری هستند. با دریافت و جذب انرژی تابشی خورشید، دمای لایه های زیرین در اثر جذب این انرژی افزایش می یابد. ولی به علت غلظت و چگالی بیشتر، به لایه های بالاتر جابجا نمی شوند. در نتیجه لایه های زیرین تا دماهای بالا و نزدیک به 90 درجه سانتیگراد گرم می مانند.



شکل 2- 11- شماتیک عملکرد یک استخر خورشیدی

دو گزینه گیرنده های مسطح و استخر خورشیدی خورشیدی بیشتر در کاربردهایی مانند سرمایش و گرمایش ساختمان ها و گرمایش آب مصرفی کاربرد دارند و کمتر برای استفاده در سیستم های تولید برق مورد توجه قرار گرفته اند. علت این امر را میتوان در چند مورد زیر خلاصه کرد:

1- به علت پایین بودن دما در این گیرنده ها برای تولید برق باید نیروگاههایی با سیال عامل با دمای جوش پایین مانند فریون استفاده کرد. استفاده از این مواد در سیستم های تولید برق نیازمند طراحی جدید اجزای نیروگاه و همچنین ساخت لوازم جدید و غیر استاندارد است. این امر هزینه سرمایه گذاری و قیمت انرژی تولید شده را به شدت افزایش می دهد. در صورتی که برای نیروگاههای بخار لوازم استاندارد وجود دارد که قابل تهیه از شرکت های سازنده میباشد.

2- در گیرنده های مسطح به علت بالا بودن مساحتی که با هوای آزاد، امکان انتقال حرارت دارد هزینه عایق بندی سیستم بسیار بالا می رود.

در گیرنده های حوضچه خورشیدی با اینکه هزینه سرمایه گذاری پایین به نظر می رسد ولی کنترل غلظت حوضچه و همچنین ثابت نگه داشتن غلظت لایه های آن نیازمند سیستم کنترلی پیچیده ای است که هزینه عملیات را به شدت افزایش می دهد. در نتیجه قیمت برق تولیدی بالا می رود. در این حوضچه ها چون از کل انرژی دریافتی استفاده نمی شود و اتلاف زیاد انرژی نیز وجود دارد، بازدهی جذب انرژی تابشی پایین است.



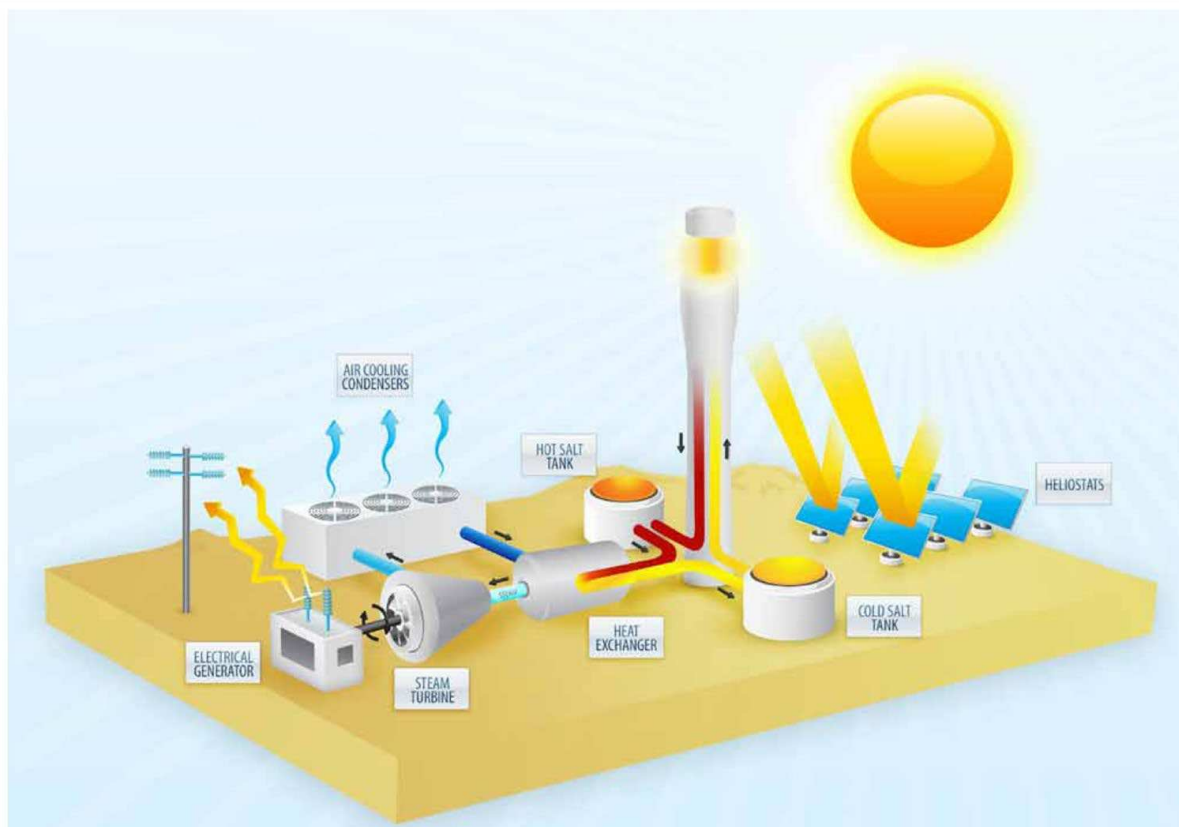
شکل 2- 12- استخر خورشیدی

## 2-7 نیروگاههای خورشیدی هیبرید (دوگانه)

یکی از گزینه های جدید نیروگاههای خورشیدی که در سال های اخیر بسیار مورد توجه بوده اند نیروگاه های خورشیدی هیبرید هستند. در این نیروگاهها تکنولوژی نیروگاه خورشیدی با گیرنده ی ناودانی، در ترکیب با سیکل ترکیبی توربین گاز به کار گرفته شده است. در این نیروگاهها از انرژی تولید شده در دریافت کننده های خورشیدی در مرحله ی تبخیر در چرخه ی بخار و از گاز خروجی از توربین گاز در پیش گرمکن و فوق گرمکن استفاده می شود. مزایای سیستم نیروگاه های خورشیدی هیبرید عبارتند از:

- 1- قسمت بخار در نیروگاههای خورشیدی نیاز به راه اندازی مجدد در هر روز دارد که بسیار زمان بر و پرهزینه است. با این ترکیب می توان از قسمت بازایاب سیکل ترکیبی در زمان هایی که انرژی خورشیدی نداریم برای ادامه ی کارکرد سیکل استفاده کرد.
- 2- بازده ی ترمودینامیک به حداکثر می رسد زیرا در این حالت تنها پیش گرم و فوق گرم کردن در بازایاب سیکل ترکیبی اتفاق می افتد و در شرایط یکسان فشار و دمای بالاتری برای بخار قابل دست یابی است.

3- این چالش از نظر قانون دوم ترمودینامیک نیز بهینه است. زیرا در بازیاب سیکل های ترکیبی بیشترین تولید آنتروپی در فرآیند تبخیر اتفاق می افتد. زیرا اختلاف دمای بیشتری بین دمای بالا و پایین چرخه ایجاد می شود.



شکل 2- 13- شماتیک نیروگاه خورشیدی هیبرید

## 2-8 مقایسه نیروگاههای حرارتی خورشیدی موجود

در این بخش برای تحلیل و نتیجه گیری، نیروگاههای حرارتی خورشیدی را که در سطح دنیا ساخته شده و به بهره برداری رسیده اند از نظر اقتصادی و عملکرد با یکدیگر و نیز با یک نیروگاه سوخت فسیلی مقایسه می کنیم. این مقایسه به طور جداگانه برای دو نوع نیروگاه متصل به شبکه و جدا از شبکه صورت گرفته است. برای مقایسه این نیروگاه ها و محاسبه هزینه ی همتراز شده انرژی لازم است بدانیم هرکدام از این نیروگاهها سالیانه معادل چند ساعت کار می کنند.

در جدول 2-6 این مقادیر بر حسب میزان تابش<sup>1</sup> سالانه آورده شده است. از طرفی در این جدول، این مقادیر با میزان ساعت های کارکرد سیستم فتوولتایک در همان سال مقایسه شده اند.

برای مقایسه اقتصادی سیستم های خورشیدی متصل به شبکه، یک نیروگاه خورشیدی با گیرنده ی ناودانی (در دو حالت 100% خورشیدی و نیروگاه هیبرید که 75% ظرفیت تولید توسط بخش خورشیدی تأمین میشود)، یک برج خورشیدی، یک نیروگاه دریافت کننده ی بشقابی، یک نیروگاه دودکش خورشیدی و نیز یک نیروگاه بخار با سوخت ذغال سنگ را بررسی کرده ایم.

در این جدول هزینه ها بر حسب ارزش مارک آلمان در 1995 محاسبه شده است. قیمت برق، مربوط به سال اول کارکرد است. نرخ تنزیل 7 درصد است و 10 درصد بابت هزینه ملحقیات به سرمایه گذاری اضافه شده است. قیمت سوخت برای نفت 6.8 مارک برگیکاژول منظور شده است.

جدول 2-5- مقایسه نیروگاههای خورشیدی موجود

توان تولید	MW	آینه های سهمی گون	دریافت کننده ی مرکزی حجمی	بشقابی- استرلینگ	دودکش خورشیدی	استخر خورشیدی	سلول های نوری
توان تولید	80	30	1	30	5	0.385	
تشعشع کلی افقی سالانه	$\frac{Kwh}{m^2a}$	2176	2276	2165	2300	1850	1807
تشعشع طراحی سالانه	$\frac{Kwh}{m^2a}$	2263	2500	2349	2300	1850	2050
ساعات کارکرد با تمام ظرفیت در سال	$\frac{h}{a}$	4200	2760	1753	2894	4316	1977
ظرفیت ذخیره	h	0	0	0	13	12	-

<sup>1</sup> Irradiation

							سازی
3571	925055	380391 3	4675	16042 8	470265	$m^2$	سطح جمع کننده ها
فقط انرژی خورشید	فقط انرژی خورشید	فقط انرژی خورشید	فقط انرژی خورشید	گاز طبیعی	نفت و گاز		نوع سوخت
0	0	0	0	6185	6282	$\frac{Kj}{KWh}$	مصرف ویژه سوخت
100	100	100	100	50.2	49.3	%	سهم انرژی خورشید در سال
0.104	0.012	0.01	0.16	0.121	0.149		بازده سالانه انرژی خورشیدی -الکتریکی
تک کریستال ی			غشای متسمع	خنک کننده خشک	خنک کننده تر		توضیحات دیگر
							مسائل زیست محیطی:
7143	971308	399410 9	14960	64171 1	131674 1	$m^2$	زمین مورد نیاز
0	11507	0	0	0	3222	$m^3$	آب مورد نیاز
0	0	0	12	401	1176	$m^3$	آب برای تمیز کردن جمع کننده ها
0	0	0	0	33	44.3	%	نسبت



							انتشار دی اکسید کربن
							هزینه ها:
5.97	10.77	95.85	13.38	56.14	209.3	میلیون مارک	جمع کننده های خورشیدی
1.22	3.41	136.92	0	40.09	32.93	میلیون مارک	سایر قطعات خورشیدی
0	10.25	0	0	68.4	152	میلیون مارک	تجهیزات قدرت
7.91	26.88	256.05	14.72	181.09	433.62	مارک بر کیلووات	هزینه کل سرمایه گذاری
20551	5376	8535	14716	6036	5421	مارک بر کیلووات	کل هزینه ویژه سرمایه گذاری
							هزینه های عملکرد:
0.75	2.54	24.17	1.30	17.09	40.93	میلیون مارک در سال	هزینه های سرمایه گذاری
0.07	0.2	0.35	0.21	2.66	3.92	میلیون مارک در سال	هزینه های پرسنلی
0.08	2.69	0.64	0.29	3.62	8.67	میلیون مارک در سال	هزینه های تعمیر و نگهداری و راهبری
0.02	0.05	0.51	0.03	0.36	0.87	میلیون	هزینه بیمه



						مارک در سال	
0	0	0	0	6.28	14.35	میلیون مارک در سال	هزینه سوخت
0.91	5.48	25.67	1.92	30.02	68.75	میلیون مارک در سال	هزینه کل عملکرد سالانه
1.198	0.254	0.296	1.097	0.266	0.202	مارک بر کیلووا ت	قیمت برق

بیشترین بازده سالانه تبدیل انرژی خورشیدی به برق در شیوه هایی که از تابش مستقیم و متمرکز خورشید استفاده می کنند به دست می آید. (نیروگاههای بشقابی - استرینگ - 16 درصد، نیروگاههای آینه های سهمی گون 14.9% و نیروگاههای دریافت کننده مرکزی 14.1%). از طرفی این روشهای تبدیل انرژی در مقایسه با روش های دیگر نیاز به کمترین مقدار زمین دارند. نیروگاههایی که قابلیت پیوند با سیستم پشتیبان سوخت فسیلی را دارند یعنی آینه های سهمی گون و دریافت کننده مرکزی، توان تولید بالا در مواقع عادی و مواقع قله بار را دارند. این مشخصه ی روشهای مذکور، امکان اتصال اینگونه نیروگاهها را به شبکه انتقال فراهم می کند. استخراج خورشیدی نیز بدلیل ذخیره سازی ماهوی انرژی از توان تولید بالایی برخوردار است. پیوند سیستم پشتیبان سوخت فسیلی با استخراج خورشیدی از لحاظ نظری ممکن ولی بدلیل پایین بودن بازده چرخه سیال آلی در گردش، غیرعملی است. بزرگترین اشکال استخراج خورشیدی، نیاز به مساحت زیاد زمین و حجم زیاد آب و نمک برای تأمین تغییرات غلظت نواحی مختلف استخراج است. این مسئله، بکارگیری روش استخراج خورشیدی را به مناطقی محدود میکند که در آن آب و نمک فراوانی وجود دارد.

در کشورهای در حال توسعه که مصالح مورد نیاز با قیمتهای ارزانتر و دستمزدهای کمتر قابل تهیه است؛ هزینه های سرمایه گذاری نیروگاههای دودکش خورشیدی کمتر خواهد بود. برای کاربردهایی که نیاز به توان های بالا نیست، روش های تولید برق سلول های نوری و بشقابی -

استرلینگ به همراه باتری های ذخیره کننده ی الکتروشیمیایی مناسب هستند. اگر توان بالایی مورد نیاز باشد باید سیستم پشتیبان سوخت فسیلی ژ ترکیب با این نیروگاه ها استفاده شود. مقایسه روشهای مختلف تولید برق خورشیدی نشان می دهد که هر روش، نقاط ضعف و قوت خاص خود در دارد. تصمیم گیری در مورد هر روش به مسائل پیرامونی هر نیروگاه مربوط است.

## فصل سوم

### سلول های فتوولتائیک و نیروگاههای PV

#### 3-1 مقدمه

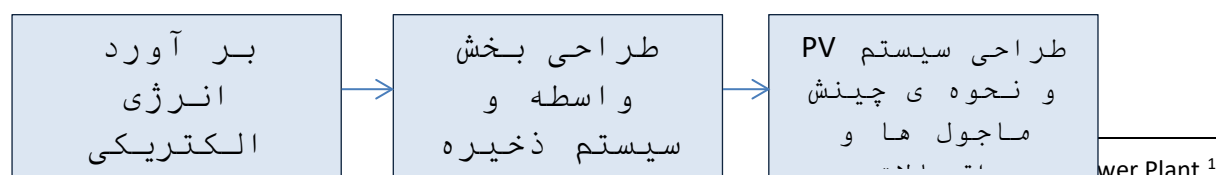
در این قسمت در ابتدا پارامترهای مختلف و اجزای سازنده ی مرتبط با طراحی یک نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک<sup>1</sup> را بررسی می کنیم و سپس با استفاده از نرم افزار sunny design یک سیستم تولید برق خورشیدی 300 کیلوواتی را طراحی اولیه می کنیم.

#### 3-2 سیستم های PV

واحدهای PV ، شارژکنترلرها، مایول ها و باتری ها<sup>[6]</sup>

#### 3-2-1 مقدمه

در طراحی یک سیستم PV می توان از چند روش استفاده نمود که مراحل اصلی آن مطابق بلوک دیاگرام زیر می باشد.<sup>[15]</sup>



دیاگرام 3-1 - مراحل اولیه طراحی یک سیستم PV<sup>[15]</sup>

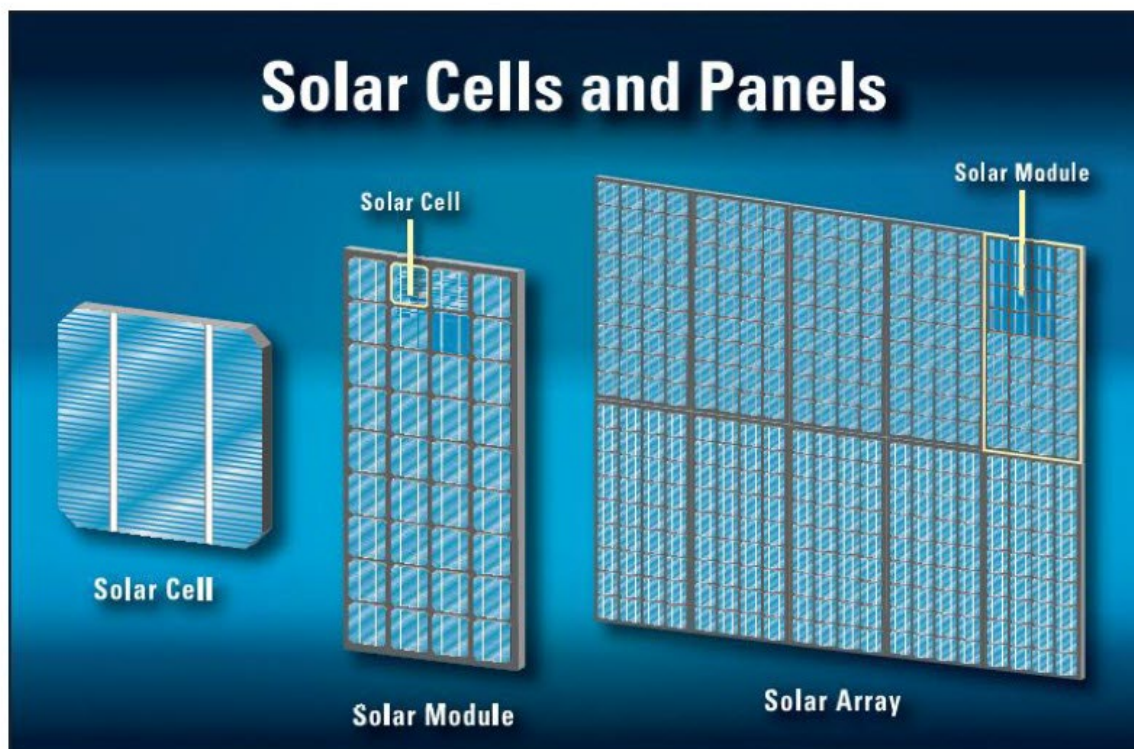
ماژول های فتوولتائیک و اینورترها اجزای اصلی یک نیروگاه فتوولتائیک هستند و انتخاب ظرفیت و چیدمان مناسب آن ها سبب افزایش بهره وری نیروگاه از پتانسیل انرژی خورشیدی موجود و نیز کاهش هزینه ی کلی سیستم می گردد.

### 3-2-2 واحدهای PV

معمول ترین واحدهای PV شامل نوع تک کریستالی و چند کریستالی سیلیکون و غیر کریستالی سیلیکون با دیگر تکنولوژی ها مانند مس، ایندیوم و کادمیوم تلوراید هستند. چند واحد از این سلول ها —همانند نمونه ی نشان داده شده در شکل صفحه بعد— به صورت موازی یا به صورت سری به هم متصل می شوند تا سطح ولتاژ و جریان دلخواه به دست آید. هدف این بخش این است که یک طرح کلی از تفاوت در عملکرد انواع مختلف واحدهای PV رایج در طراحی نیروگاه های فتوولتائیک ارائه دهد.

### 3-2-3 واحدهای کریستالی سیلیکون PV<sup>[4]</sup>

واحدهای تک بلوری و چند بلوری (کریستالی) که در شکل 1-3 نشان داده شده اند برای استفاده در ساخت بیش از 80% از انواع واحدهای PV استفاده می شوند. هرچند سلول های تک بلوری اندکی نسبت به سلول های چند بلوری به صرفه تر هستند ولی کارایی واحد ها به همان نسبت به تکنولوژی به کار رفته نیز وابسته است. سیلیکون های بلوری بازدهی حدود 10 تا 15 درصد دارند. اهمیت بالا بودن بازده وقتی که مکان و مساحت مورد نظر برای ساخت نیروگاه محدود است، مثل سقف یک خانه یا ساختمان، افزایش می یابد. بازده واحد های سیلیکون های کریستال نسبت به انواع دیگر شدیدتر با تغییرات تابش خورشید —مثلاً به وجود آمدن سایه— کاهش می یابد. واحدهای بلوری سیلیکون (C-Si) نسبت به واحدهای غیر بلوری (A-Si) ضرایب دمایی بالاتری دارند. یعنی زمانی که دمای آنها افزایش میابد ولتاژ و توان خروجی واحدهای بلوری سیلیکون (C-Si) نسبت به واحدهای غیر بلوری (A-Si) بیشتر افزایش می یابد. واحدهای بلوری سیلیکون از سطوح کمتر از یک وات تا 300 وات در بازار موجودند. واحدهای بزرگتر اتصالات کمتری نیز دارند، اما تجهیزات ویژه ی سنگین تری برای جابجایی آن ها لازم است. بیشتر واحدهای سیلیکونی دارای پوشش شیشه ای هستند و قاب های صلب دارند که آنها را سنگین تر و حساس تر از دیگر انواع واحد ها میکند.



شکل 3-1- سلول ها و پنل های خورشیدی<sup>[7]</sup>

#### 3-2-4 واحدهای غیر بلوری سیلیکونی (A-Si)<sup>[4]</sup>

در اصل سلولهای A-Si قطعات تک پیوندی بودند. با گذر زمان تولیدکننده ها روش هایی از انباشته کردن دو یا سه سلول را برای بالا بردن بازده واحدها عرضه کردند. اما هنوز، بازده واحدهای A-Si حدود 5 تا 7 درصد یعنی حدود نصف واحدهای کریستالی میباشد. بازده کمتر به این معنی است که یک آرایه از A-Si ها باید اندازه بزرگتری نسبت به یک C-Si داشته باشد تا همان میزان توان را تحویل دهد. خصوصیت دیگری که طراحان سیستم های PV باید در نظر بگیرند این است که خروجی واحدهای غیر بلوری سیلیکونی (A-Si) در چند هفته اول کارکرد خود 15 تا 20 درصد افت خواهند داشت ، تا پس از طی این مدت به مقدار خروجی نامی اش برسد. واحدهای A-Si چندین برتری نسبت به واحدهای C-Si دارند. همه ی واحدهای PV زیر آسمان صاف و دمای سردتر عملکرد بهتری دارند. اما در دماهای کاری بالا، خروجی واحدهای A-Si کمتر از خروجی واحدهای C-Si افت می کند. این مطلب زمانی که آرایه سیلیکونی در آب و هوای گرم به کار گرفته شود می تواند بحرانی باشد. همچنین در عمل هنگام کاهش درخشندگی نور خورشید یا زمان سایه، خروجی واحدهای A-Si کمتر دچار افت میشود.



شکل 3-2- مازول  $a-Si$  [7]

### 3-2-5 واحدهای PV ساخته شده از دی سلناید مس-اینیدیوم (CIS) [4]

واحدهای ساخته شده از دی سلناید مس-اینیدیوم (CIS)، نشان داده شده در شکل 3-3، در بازار واحدهای PV تکنولوژی نسبتاً جدیدی محسوب میشود؛ و در حال حاضر فروش جهانی حدود 0.5 درصد از انواع واحدهای PV را دارد. در میان همه ی واحدهای لایه نازک، CIS بالاترین بهره را دارد که حدود 9.5 % است. این واحدها ظاهر تخت و سیاهی دارند که از انواع دیگر زیباتر است. ضریب دمایی<sup>1</sup> ولتاژ و توان در واحدهای CIS بالاتر از انواع دیگر واحدهای PV است؛ و این به این معنی است که خروجی آن نسبت به دیگر تکنولوژی ها افت بیشتری در دماهای بالا خواهد داشت. یک واحد CIS حداکثر تا 80 وات توان الکتریکی تحویل میدهد.

<sup>1</sup> ضریبی برای سنجش میزان افت ولتاژ و توان خروجی با افزایش یک واحد دما می باشد و مقدار آن در سلول های خورشیدی منفی است.



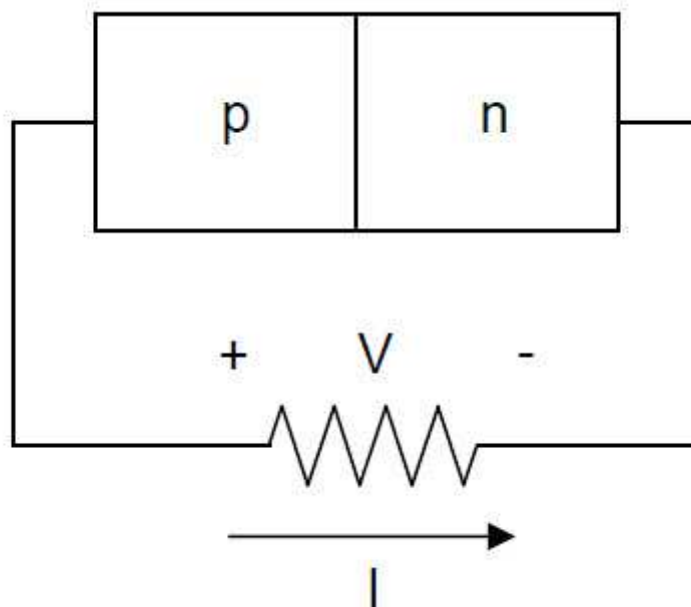
### 3-2-6 واحدهای PV ساخته شده از کادمیم تلوراید (CdTe)

خاصیت منجر به تشکیل جفت الکترون-حفره در نیمه رسانا می‌گردد. جابجایی الکترون ها و حفره ها از میان پیوند  $p-n$  در جهت های مخالف عامل ایجاد برق با جریان مستقیم است. با برخورد نور به مواد نیمه رسانا، انرژی نور جذب ماده ی نیمه رسانا می شود که باعث آزاد سازی الکترون در نیمه رسانا می شود. برای مثال، یک اتم سیلیکون 14 الکترون دارد که در سه پوسته ی مختلف روی هم قرار گرفته اند. دو لایه ی اول که به مرکز نزدیک تر هستند، کاملاً پر شده اند. ولی لایه ی بیرونی 4 الکترون دارد که نیمه پر است. به همین دلیل اتم سیلیکون همیشه تمایل زیادی به جذب الکترون دارد تا لایه ی انتهایی خود را کامل کند. به همین دلیل 4 الکترون لایه ی آخر را با 4 الکترون لایه ی آخر اتم همسایه اش به اشتراک می گذارد. هر اتم سیلیکون به همین ترتیب با 4 اتم همسایه متصل می شود. وقتی انرژی به سیلیکون خالص می رسد — مثلاً از طریق گرما یا تابش — موجب می شود پیوند تعدادی از الکترون ها در اتم ها شکسته شود و یک حفره ایجاد شود. الکترون های آزاد شده پیرامون شبکه ی بلوری پراکنده می شوند و حفره های دیگری را جست و جو می کنند. این الکترون ها «حامل های آزاد» نامیده می شوند. در سیلیکون ناخالص — مثلاً در ترکیب با اتم های فسفر — انرژی بسیار کمتری برای ضربه زدن به الکترون های سست اتم ها لازم است؛ زیرا آن ها در پیوند بین اتم های همسایه مقید نشده اند. بنابراین الکترون های آزاد بیشتری به وجود می آید و نسبت به سیلیکون خالص حامل های آزاد بیشتری ایجاد می شود.<sup>[16]</sup> اضافه کردن ناخالصی را «ناخالص سازی» می گویند. سیلیکون به دست آمده به دلیل پخش الکترون های آزاد نوع  $n$  نامیده می شود. سیلیکون آلاییده ی نوع  $n$  رسانای بسیار بهتری نسبت به سیلیکون خالص است. البته فقط بخشی از یک سلول خورشیدی سیلیکون آلاییده ی نوع  $n$  است. سایر قسمت های سلول با بور آلاییده می شود که فقط 3 الکترون در لایه بیرونی خود دارد. به این ترتیب سیلیکون به جای داشتن الکترون های آزاد دارای حفره های آزاد میشود و به آن سیلیکون آلاییده ی نوع  $p$  می گویند. حفره ها در واقع فقدان الکترون هستند. الکترون های اضافی توسط پروتون های اضافی فسفر از تعادل خارج می شوند. الکترون های از دست رفته (حفره ها) با پروتون های از دست رفته ی بور نیز تعادل را از بین می برند. ولی در نهایت موازنه برقرار می شود و یک میدان الکتریکی شکل می گیرد که باعث حرکت جهت دار الکترون های برانگیخته شده توسط انرژی تابشی می شود. در نتیجه با اتصال مجموعه سلول ها به یک بار جریان — جریان مستقیم — ایجاد می شود.

ساختار ابتدایی این سلول ها در شکل 3-4 نشان داده شده است. بیشترین ماده ای که در سلول های PV مورد استفاده قرار میگیرد سیلیکون مونوکریستال یا پلی کریستال میباشد. هنگامی که یک



سلول خورشیدی در برابر نور خورشید قرار می گیرد جفت های الکترون-حفره تولید میکند. متناظر با این فرایند یک فرایند باز ترکیبی نیز وجود دارد. هر بار که الکترون ها به نیمه رسانای نوع p میرسند با حفره هایی که هنگام شکل گیری جفت های الکترون-حفره به وجود می آیند باز ترکیب  $\rightarrow$  1- شد. به منظور تشریح عملکرد یک سلول خورشیدی یک مدار متصل به مقاومت در شکل نشان داده شده است. اگر یک جریان از درون مدار مقاومتی خارجی عبور کند باعث افت پتانسیل در مقاومت میشود و این بدان معناست که سلول خورشیدی با جریان I و ولتاژ V در حال فعالیت است. این ولتاژ در فرایند باز ترکیبی تأثیر میگذارد، چرا که این فرایند به صورت نمایی به ولتاژ وابسته است. بنابراین اگر بار خیلی زیاد باشد ولتاژ افزایش می یابد. به این ترتیب پیش از آنکه الکترون به مدار خارجی برسد فرایند باز ترکیبی رخ می دهد و از ایجاد جریان ممانعت میکند.

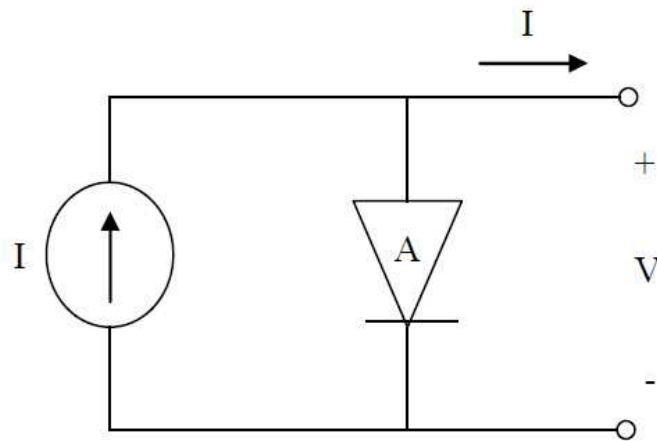


شکل 3-4- ساختار یک سلول فتوولتائیک [4]

مشخصه الکتریکی یک سلول PV در برابر نور خورشید و در ناحیه مفید عملکرد بوسیله ی منحنی I-V نشان داده می شود. منحنی مهم دیگری که به منظور مطالعه ی عملکرد یک سلول خورشیدی مورد استفاده قرار می گیرد منحنی P-V است. معادله ی مشخصه ی یک سلول PV به صورت زیر میباشد:

$$I = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{qv}{AkT}} - 1 \right)$$

بطوریکه  $I$  جریان در سلول PV،  $I_{sc}$ ، جریان اتصال کوتاه،  $V$  ولتاژ سلول PV،  $I_0$ ، جریان اشباعی دیود،  $K$  ثابت بولتزمن،  $q$  بار پایه،  $T$  دمای سلول و  $A$  ضریب بهینگی دیود می باشد. شکل 3-5 مدار معادل دیودی یک سلول PV نمونه را نشان میدهد.



شکل 3-5- مدار معادل دیودی یک سلول فتوولتائیک [4]

ولتاژ مدار باز به صورت زیر می باشد:

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc} + I_0}{I_0} \right)$$

بنابراین سه پارامتر مهمی که استفاده زیادی در تشریح عملکرد الکتریکی یک سلول دارد جریان اتصال کوتاه مدار  $I_{sc}$ ، ولتاژ مدار باز  $V_{oc}$ ، و توان بیشینه  $P_{max}$  می باشد. پارامتر اول به وسیله اتصال کوتاه کردن پایانه های خروجی و اندازه گیری جریان مشاهده شده در پایانه ها به دست می آید. جریا (2- این حالت بدست می آید بیشینه ی جریانی است که سلول میتواند تولید کند. بیشینه ی ولتاژی که توسط سلول تولید میشود ولتاژی است که بوسیله ی مدار باز کردن بدست می آید.  $P_{max}$  بیشینه ی مقدار حاصلضرب ولتاژ و جریان خروجی در شرایط مختلف بار میباشد. در شرایط یکنواخت  $P_{max}$  در محدوده ی 80 % ولتاژ مدار باز قرار میگیرد.

ضریب  $FF^1$  نیز پارامتر مهم دیگر در توصیف مشخصات کارکرد یک سلول PV میباشد. این پارامتر کیفیت و عملکرد سلول PV را نشان میدهد. این پارامتر نسبت توان بیشینه به حاصلضرب  $I_{sc}$  و  $V_{oc}$  را نشان میدهد و به صورت زیر می باشد.

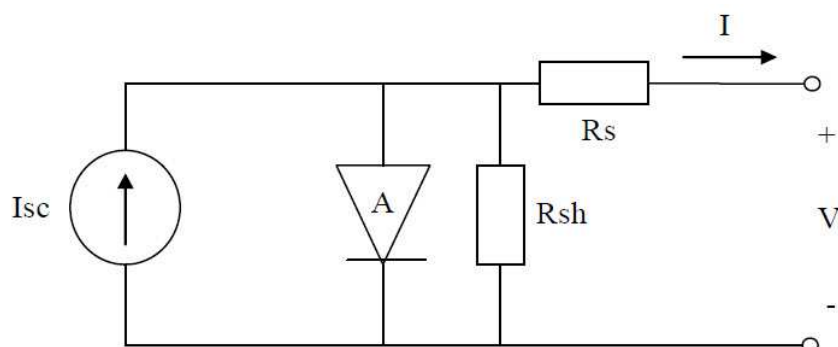
<sup>1</sup> Fill Factor

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}}$$

سلول های PV دارای عنصرهای پارازیتی نیز میباشند که با مقاومت سری  $R_{sc}$  و مقاومت موازی  $R_{sh}$  مدل 3-3. د. مقاومت سری  $R_{sc}$  مربوط به مقاومت bulk نیمه رسانا، اتصال فلزی و غیره میباشد. مقاومت موازی  $R_{sh}$  به دلیل عدم ایده آل بودن سلول در نزدیکی پیوند p-n در مدل لحاظ می شود. بنابراین معادله ی مشخصه به شکل زیر تغییر میکند.

$$I = \frac{R_{sh} \left\{ I_{pv} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right) - 1 \right] \right\} - V}{R_s + R_{sh}}$$

که در این معادله  $I_{pv}$  جریان نوری سلول میباشد. شکل 3-6 مدار معادل سلول PV را نشان میدهد (4-). مقاومت های پارازیتی نیز می باشد. مقاومت های پارازیتی عملکرد سلول PV را تحت تأثیر قرار می دهند.



شکل 3-6- مدار معادل دیودی یک سلول با المان های پارازیتی<sup>[17]</sup>

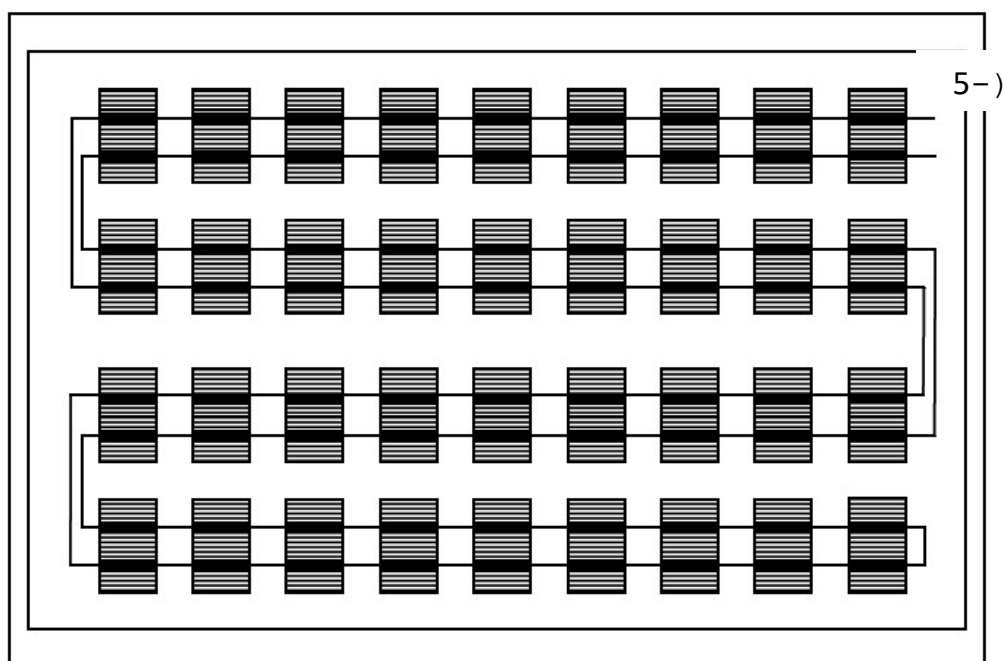
### 3-3 واحدهای PV<sup>1</sup>[4]

یک سلول PV در اختلاف پتانسیل 0.5 ولت کمتر از 3 وات توان تولید میکند. برای بیشتر کاربرد ها سلول های PV بایستی با آرایشی سری-موازی بهم متصل شوند تا اختلاف پتانسیل و توان مورد نیاز را تولید کنند. یک واحد PV از اتصال مجموعه ای از سلول های خورشیدی به دست می آید. در ساختار داخلی یک واحد PV، سلول های مختلف روی یک زیر لایه ی اصلی

نصب شده اند و بوسیله ی رشته ها ی سری 36 یا 72 سلولی بهم وصل شده اند تا ولتاژ مورد نیاز خروجی را تولید کنند.

شکل 3-7 نمایی کلی از چگونگی اتصال 36 سلول به صورت سری در یک واحد از سلول های نوری را نشان می دهد. در این اتصال جریانی یکسان از همه ی سلول ها عبور میکند، اما ولتاژ کل تولید شده توسط واحد PV، جمع ولتاژ تک تک سلولهاست. وقتی که سلول ها به صورت موازی به هم وصل میشوند ولتاژ درون پایانه های واحد PV، مساوی ولتاژ یک تک سلول است. در حالی که جریان خروجی از جمع جریان تک تک سلول ها بدست می آید.

حال اگر به هر دلیلی شدت تابش یک سلول در مقایسه با سایر سلول ها کاهش یابد میزان توان و ولتاژ خروجی آن سلول کاهش می یابد؛ و ممکن است که سلول به صورت معکوس بایاس شود. اگر سلول ها به صورت سری به یکدیگر وصل شده باشند، سلولی که تابش کمتری جذب کرده است به صورت یک بار عمل میکند که منجر به تولید گرما و خرابی آن میشود. برای محافظت سلول در برابر این اتفاق، دیودهای کنارگذر واحد های PV را محافظت می کنند.

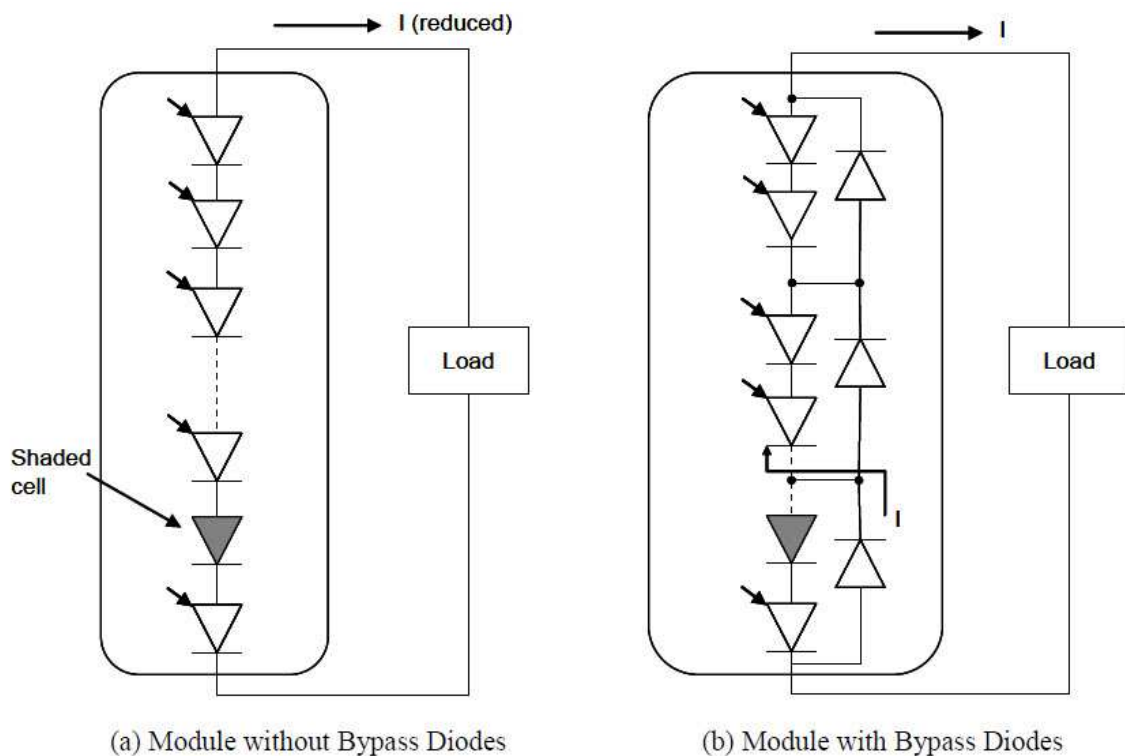


شکل 3-7- ساختار یک مایول با 36 سلول سری متصل به هم<sup>[4]</sup>

برای محاسبه ی تعداد واحدهای خورشیدی مورد نیاز در طراحی رابطه ی زیر را داریم<sup>[15]</sup>:

$$N_{pv} = \frac{(E_t + E_{bat} * 0.07)}{(P_{pv} * H_s)}$$

که در این معادله  $E_t$  انرژی الکتریکی مورد نیاز در یک شبانه روز بر حسب وات ساعت و  $P_{pv}$  توان پنل فتوولتائیک است.  $H_s$  ساعات تابش خورشیدی منطقه مورد طراحی است.  $N_{pv}$  تعداد پنل فتوولتائیک مورد نیاز است و  $E_{bat}$  ولتاژ باتری های ذخیره کننده ی توان الکتریکی است که برای ساعات شب یا ساعات ابری از آن استفاده می شود.

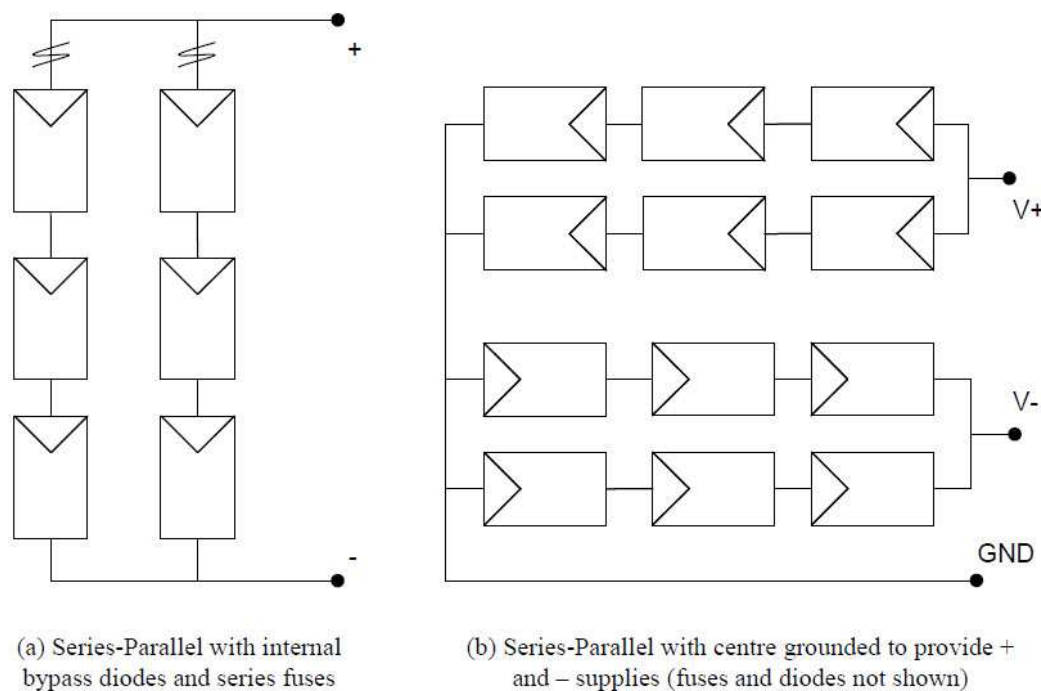


شکل 3-8- حفاظت با دیودهای بای پس<sup>[4]</sup>

### 3-1-3 آرایه های PV<sup>[4]</sup>

یک آرایه ی PV مجموعه ای از واحدهای PV است که جهت تحویل دادن توان برای یک بار خاص یا یک عملکرد مشخص بر صفحه ای یکسان به یکدیگر متصل شده اند. مانند شیوه ی عملکرد سری-موازی در سلول های PV، در آرایه های PV نیز اتصال سری واحدها باعث میشود به ولتاژ بالاتری برسیم و اتصال موازی آنها باعث میشود به جریان بالاتری برسیم. در حالت سری بستن واحدها می توان با ثابت نگه داشتن جریان به توان بیشینه رسید و در حالت موازی با ثابت نگه داشتن ولتاژ می توان به سطح بیشینه ی تولید توان دست یافت. شکل 3-9 دو شیوه ی معمول چینش و ترکیب واحدها را نشان می دهد. چینش (الف) در شکل آرایش سری-موازی با

فیوزهای سری شده با رشته ی سری را نشان میدهد. در شکل (ب) قطبهای مثبت و منفی با توجه به زمین تعریف می شوند.



شکل 3-9- مثال هایی از آرایه های PV<sup>[4]</sup>

### 3-4 شارژ کنترلرها<sup>[6]</sup>

هدف اصلی شارژ کنترلرها جلوگیری از شارژ شدن اضافی<sup>1</sup> یا کم شارژ شدن<sup>2</sup> باتری میباشد. بعضی از ویژگیهای شارژ کنترلرها به شرح زیر است:

1- جلوگیری از شارژ شدن اضافی باتری

2- حفاظت Over-Shunt

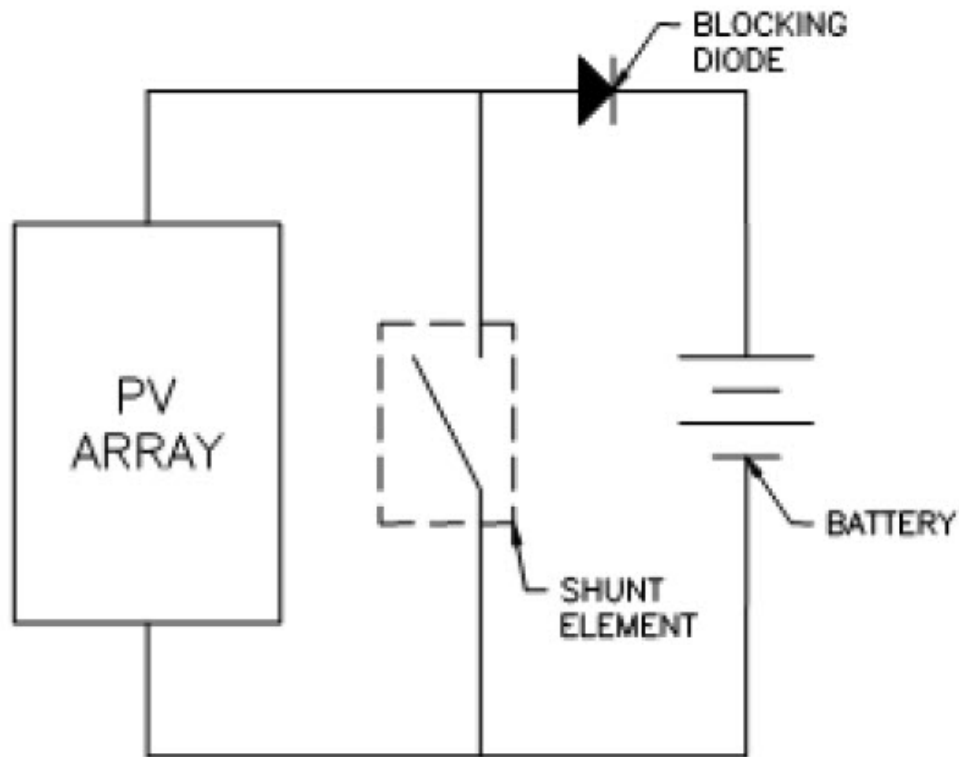
3- تنظیمات قابل تغییر

### 3-4-1 رگولاتور شانت

رگولاتورهای شانت ادوات حالت جامد هستند. یک ترانزیستور بین آرایه ای و یک دیود بین جهت مثبت باتری و مثبت آرایه قسمت های اصلی آن را تشکیل می دهند. در طول شارژ شدن، جریان از آرایه به باتری حرکت میکند. زمانی که ولتاژ باتری به حد ولتاژ قطع آرایه می رسد، ترانزیستور فعال میشود و آرایه را اتصال کوتاه میکند. دیود مانع از اتصال کوتاه شدن باتری میشود. همچنین دیود

<sup>1</sup>overcharge  
<sup>2</sup>undercharge

مانع از برگشت جریان از باتری به آرایه در زمان کاهش یا قطع انرژی تابشی در ورودی آرایه مثل شب یا ساعات ابری می شود. زمانی که ولتاژ باتری افزایش یافته و به حد بالاتر از ولتاژ وصل آرایه برسد ترانزیستور قطع شده و مجدداً جریان در باتری برقرار می شود. شماتیک ای سیستم در شکل 3-10 نشان داده شده است.



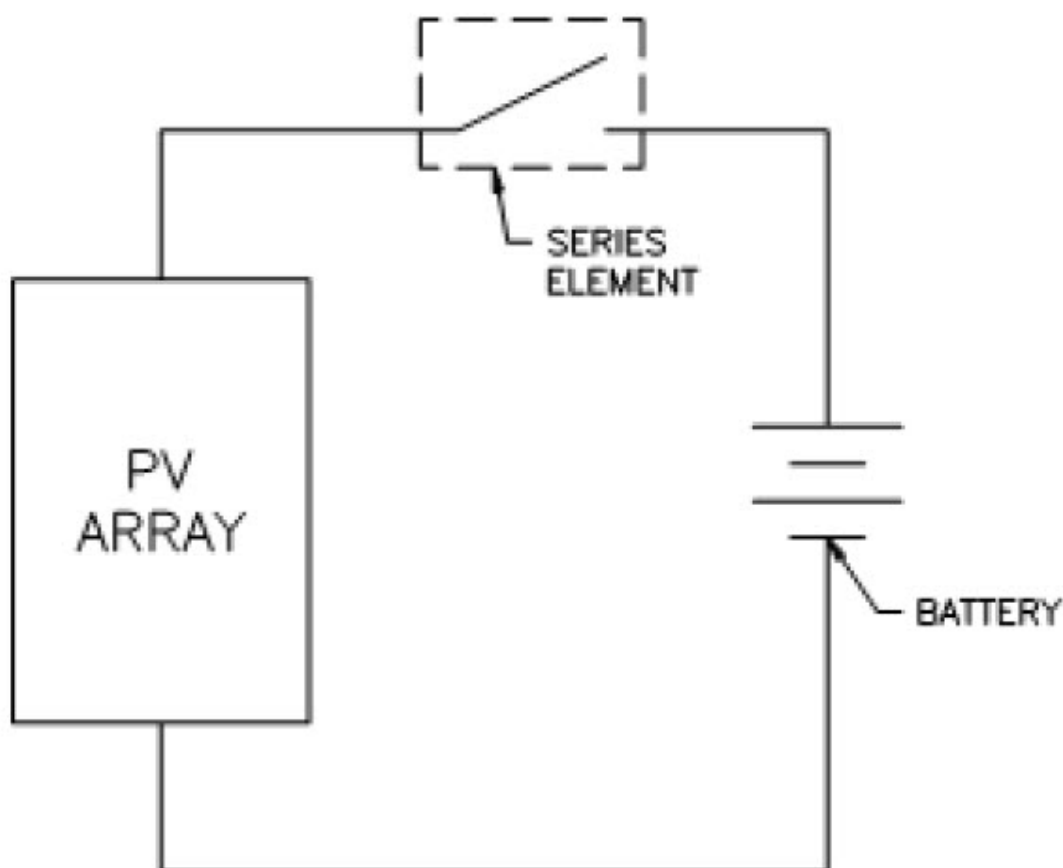
شکل 3-10 - رگولاتور شانت<sup>[3]</sup>

این نوع شارژ کنترلر در سیستم های با توان کم و میزان ولتاژ پایین استفاده می شود. اگرچه اتصال کوتاه شدن به آرایه آسیبی نمی زند اما ممکن است مقدار زیادی جریان از ترانزیستور عبور کند. هر چه آرایه بزرگتر باشد جریان گذرنده از ترانزیستور بیشتر بوده و توان بیشتری به صورت گرما در ترانزیستور از دست می رود. همچنین باعث ایجاد افت ولتاژ در دو سر دیود می شود.

### 3-4-2 رگولاتور سری

این نوع رگولاتورها انواع گوناگونی دارند رگولاتور سری شامل یک رله (مکانیکی یا حالت جامد) که بین رسانای مثبت باتری و رسانای مثبت آرایه قرار دارد، و یک مقایسه کننده ی ولتاژ می باشد. زمانی که ولتاژ باتری تا مقدار تنظیم وصل مجدد آرایه برسد رله بسته میشود و دوباره جریان به باتری وارد میشود. شماتیک این نوع رگولاتور در شکل 3-11 نشان داده شده است.

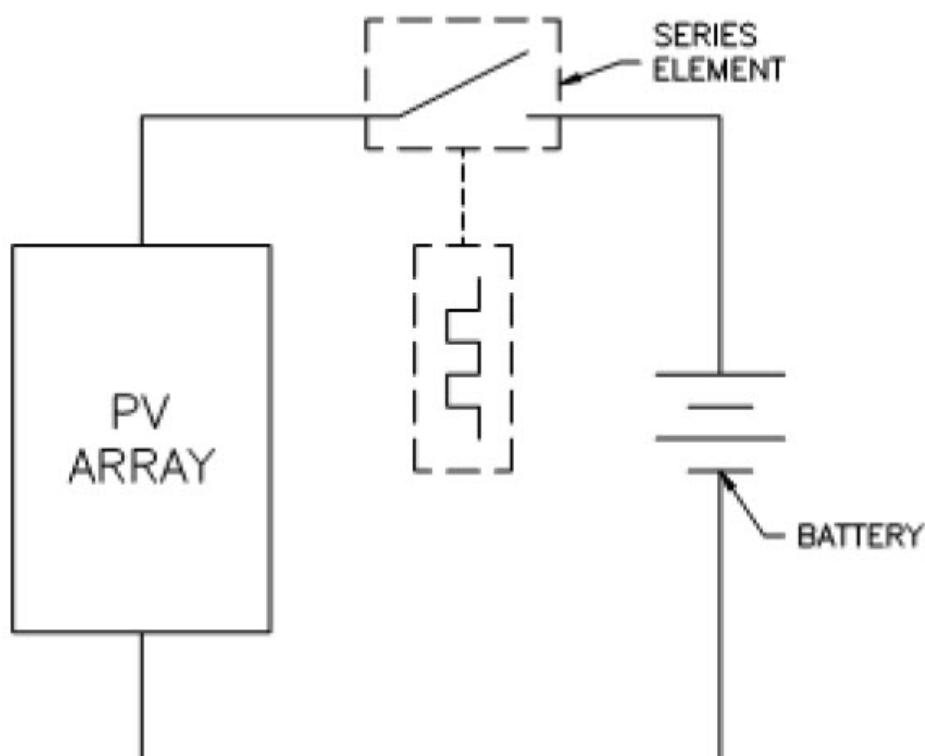




شکل 3-11- رگولاتور سری<sup>[3]</sup>

### 3-4-3 رگولاتور PWM

رگولاتورهای PWM ساختار مشابه گولاتورهای سری دارند. درگولاتور PWM یک سوئیچ حالت جامد وظیفه ی مشابه رله ی رگولاتورهای سری را بر عهده دارد. با جایگزین کردن سوئیچ حالت جامد به جای رله جریان از آرایه به باتری با سرعت بالاتری سوئیچ می شود. فرکانس سوئیچ های حالت جامد در این نوع رگولاتورها از چند هرتز تا چند کیلوهرتز تغییر می کنند. هرچه عمل سوئیچینگ سریع تر انجام شود، شارژ باتری به صورت دقیق تری کنترل می شود. رگولاتورهای PWM برخلاف رگولاتورهای سری به دیود نیاز ندارند، چون سوئیچ حالت جامد از برگشت جریان به آرایه ی PV جلوگیری میکند.

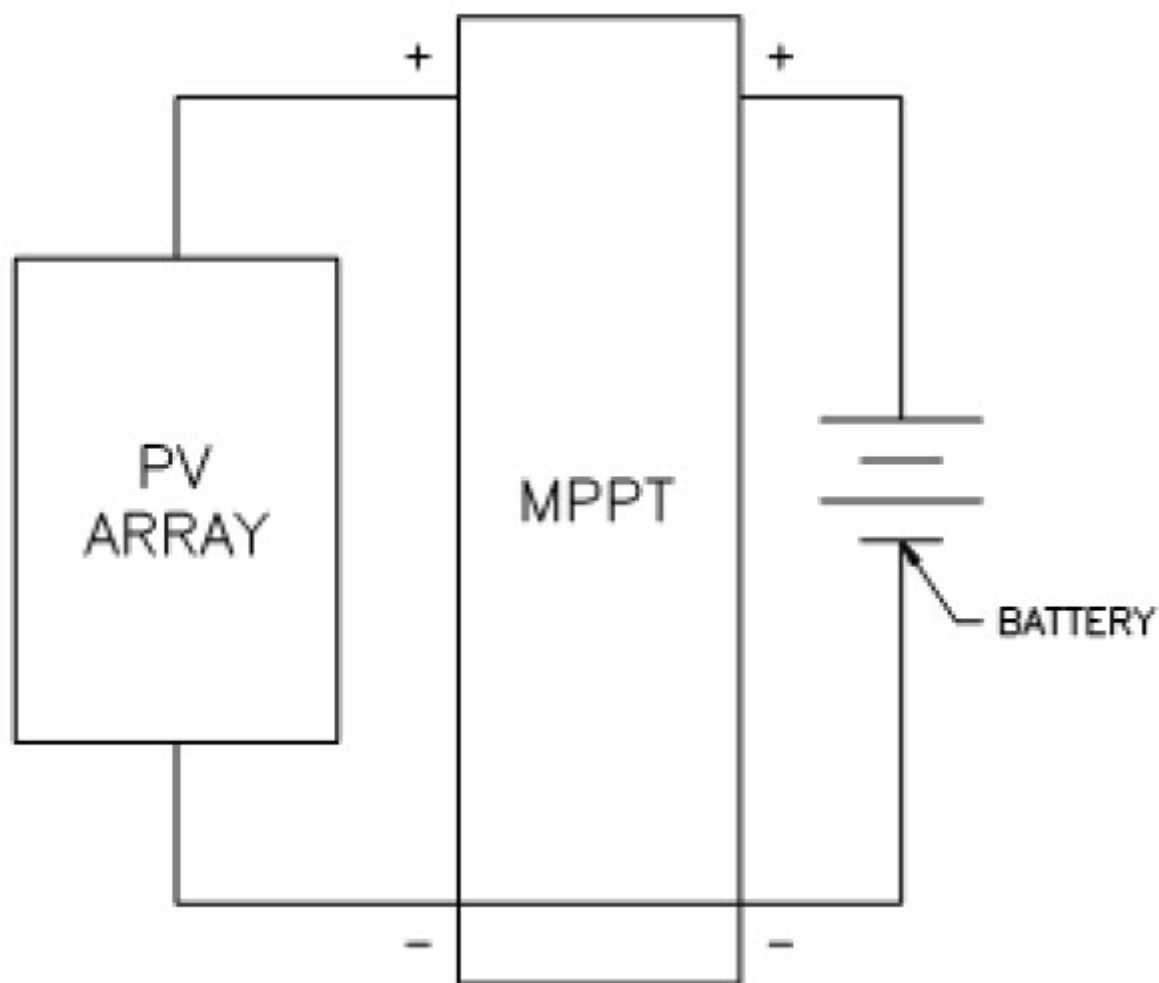


شکل 3-12- رگولاتور PWM<sup>[3]</sup>

#### 3-4-4 رگولاتور دنبال کننده نقطه توان حداکثر MPPT1

دنبال کننده های نقطه توان حداکثر نوع پیشرفته تر رگولاتورهای PWM میباشد. رگولاتور MPPT همانطور که در شکل 3-13 نشان داده شده است به آرایه ی PV اجازه ی تغییر ولتاژ باتری را میدهد. با تغییر ولتاژ ورودی آرایه ، در حالیکه ولتاژ شارژ باتری حفظ شده است، توان تولیدی آرایه PV افزایش می یابد. رگولاتور MPPT یک تکنولوژی جدید است و دارای مزایای زیادی نسبت به دیگر رگولاتورهاست. به علاوه برای گرفتن مقدار بیشتری جریان شارژ از آرایه ی PV برخی از رگولاتورهای MPPT اجازه میدهند آرایه در یک ولتاژ خیلی بالاتر کار کند. این ویژگی برای کاهش در اندازه ی سیم ها و افت ولتاژ PV مزیت مهمی می باشد. اگرچه رگولاتورهای MPPT می توانند توان خروجی واحد PV را افزایش دهند، ولی تلفات بیشتری نسبت به دیگر انواع شارژکنترلرها دارند.

<sup>1</sup>Maximum power point tracker



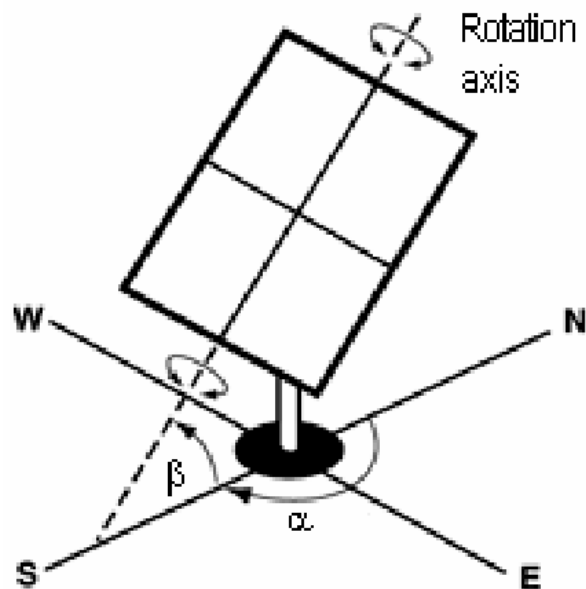
شکل 3-13- کنترلر MPPT<sup>[3]</sup>

### 3-4-5 دنبال کننده های خورشیدی<sup>[5]</sup>

پنل های متحرک متصل به یک دنبال کننده ی خورشیدی مطابق با موقعیت جغرافیایی منطقه و زاویه ی تابش خورشید در زمان های مختلف برنامه ریزی شده اند. دنبال کننده های خورشیدی اتوماتیک که بر مبنای شدت تابش نور خورشید عمل می کنند می توانند بازده تبدیل انرژی را با تغییر موقعیت دریافت کننده و تنظیم زاویه ی دریافت تابش های خورشیدی بالا ببرند. این دنبال کننده ها بازده پنل را در تابستان تا 50 % و در زمستان تا 20 % افزایش میدهند.

دنبال کننده ها بر اساس کارایی در چند دسته تقسیم بندی میشوند. دسته بندی نوع اول بر اساس محورهای چرخش است که یک دسته تک محوری و دسته دیگر دو محوری می باشند. دنبال کننده های تک محوری برای نیروگاههای با توان پایین تر مناسب است. این نوع دنبال کننده ها یک تنظیم کننده ی دستی برای محور دوم دارند که در دوره های مختلف زمانی در طول سال تنظیم

میشوند. محور اول دنبال کننده های تک محوری به یک موتور و یک کنترلر متصل است که متناسب با موقعیت خورشید دریافت کننده را می چرخاند.



شکل 3-14- اصول کارکرد دنبال کننده ی تک محوره<sup>[5]</sup>

نوع دیگر دسته بندی بر اساس نوع چرخش دنبال کننده هاست. یک نوع بر اساس برنامه ی از پیش تعیین شده بر مبنای زاویه ی تابش خورشید در زمان های مختلف عمل میکنند. نوع دوم بر اساس سنسوری که هر لحظه تابش خورشید را اندازه میگیرد. نوع دوم کارا تر است و بازده بالاتری دارد.

### 3-5 طراحی با نرم افزار Sunny Design

#### 3-5-1 پارامترهای ورودی

در این نرم افزار که محیط آن را در شکل بعدی میبینیم شرایطی را که برای طراحی نیروگاه در نظر داریم در قسمت های مربوطه وارد میکنیم. تعداد 3 آرایه هر کدام حاوی 390 پنل خورشیدی به همراه 3 اینورتر برای تغذیه ی یک سایت با ماکزیمم توان 300 کیلو وات پیش بینی شده است. ترکهای در نظر گرفته شده دو محوره هستند و دنبال کننده ی خودکار دارند. مکان اجرای طرح شهر کرمان در نظر گرفته شده است که پارامترهای تابش و گرما و دمایی آن با استفاده از نرم افزار و دیتابیس آن منظور شده است. در ادامه حدود 3000 متر کابل کشی در نظر گرفته شده که تلفات

خط 4 % برای آن در نظر گرفته شده است. 8.5 % از توان تولیدی توسط خود نیروگاه استفاده میشود.

Project: A 300Kw Solar PV  
Location: Kerman, Iran

Project overview  
PV peak power: 294.00 kWp  
Nominal AC power: 300.00 kW

Part project 1  
PV array 01  
Azimuth angle: tracked; Inclination: tracked  
PV array 02  
Azimuth angle: tracked; Inclination: tracked  
PV array 03  
Azimuth angle: tracked; Inclination: tracked  
1 x SC 100HE  
Nominal inverter ratio: 110% AC

**Yield loss**  
The PV voltage is lower than the minimum DC voltage of the inverter at the selected grid voltage. As a result energy losses will occur!

**Solutions**  
1. Increase the number of modules in the string  
2. Select a different PV module.

Project overview  
Performance  
Help

Project data | **PV plant** | Cable dimensioning | Self-consumption | Overview | Print wizard

**PV array 01** x PV array 02 x PV array 03 x

Name: PV array 01  
Manufacturer: Suntech-Power  
PV module: STP250-20/Wd (US)  
Cell temperature: -3 ... 70 °C  
Setpoint: Number of PV modules: 400  
PV peak power: 100.00 kWp  
Orientation: Azimuth angle: tracked; Inclination: tracked  
Mounting type: Free installation

1 x SC 100HE Strings  
Inverter: SC 100HE  
Number of inverters: 1  
Max. DC power: 103.00 kW  
Max. AC power: 100.00 kW  
AC connection: Three-phase  
Max. efficiency: 98.5 %  
Grid voltage: > 1000V (3~)

Overview of inverters

	PV array 01 392 / 400	PV array 02 392 / 400	PV array 03 392 / 400	PV peak power	Nominal power ratio	Energy usability factor
1 x SC 100HE	28 x 14 (A)			98.00 kWp	105 %	59.4 %
1 x SC 100HE		28 x 14 (A)		98.00 kWp	105 %	59.4 %
1 x SC 100HE			28 x 14 (A)	98.00 kWp	105 %	59.4 %

**Yield loss**

Configuration  
Inverter: SC 100HE PV array: PV array 01

Sunny Design - A 300Kw Solar PV

File Project Tools Help

Project: A 300Kw Solar PV  
Location: Kerman, Iran

Project overview  
PV peak power: 294.00 kWp  
Nominal AC power: 300.00 kW

Part project 1  
PV array 01  
Azimuth angle: tracked; Inclination: tracked  
PV array 02  
Azimuth angle: tracked; Inclination: tracked  
PV array 03  
Azimuth angle: tracked; Inclination: tracked  
1 x SC 100HE  
Nominal inverter ratio: 110% AC

**"Cable dimensioning" tab**  
You can dimension the cables here.  
The diagram shows the cable routes in the PV plant:  
• "DC" indicates the lines from the inverter to the first PV module in the string.  
• "AC1" indicates the lines from the inverter to a potential sub-distribution.  
• "AC2" indicates the lines from a potential sub-distribution to another potential sub-distribution.

Project overview  
Performance  
Help

Project data | **PV plant** | **Cable dimensioning** | Self-consumption | Overview | Print wizard

The calculation of the AC cable losses is not supported for projects with grid connection "medium voltage".

DC AC 1 kWh

Project DC cables AC1 cables AC2 cables Sub-distribution available

Settings  
Consider the line losses in the yield calculation: ☐ DC ☐ AC

Total losses

	DC	AC	Total
Total cable length:	3072.38 m	---	3072.38 m
Cable cross sections:	#2 AWG	---	#2 AWG
Power loss at nominal operation:	104.39 W	---	104.39 W
Rel. power loss at rated nominal operation:	0.04 %	---	0.04 %

Pay attention to all national and international standards (such as VDE, NEC etc.) with respect to the cross-sections of the cables. SMA Solar Technology AG recommends a relative power loss at rated nominal conditions of < 1% on the AC side and/or on the DC side. The influence of different displacement power factors is not taken into account in case of three-phase current!

سپس اطلاعات مربوط را با توان خروجی در طول سال 400 MWh همراه با کلیه اطلاعات لازم برای انتخاب پنل ها و اینورترها جهت ساخت به عنوان خروجی آورده میشود.

Any Company • Any Street 21 • 54321 Any Town

An Imaginary Desert Site

Any Company  
Any Street 21  
54321 Any Town

Tel.: +49 123 456-0  
Fax: +49 123 456-100  
E-Mail: info@any-company.de  
Internet: www.any-company.de

**Project name:** A 300Kw Solar PV  
**Project number:** 03  
**Project file:** My Design.sdp2

**Location:** Iran / Kerman  
  
Grid voltage: 3~20 kV

### System overview

#### 392 x Suntech-Power STP250-20/Wd (US) (PV array 01)

Azimuth angle: tracked, Inclination: tracked, Mounting type: Free installation, PV peak power: 100.00 kWp

#### 392 x Suntech-Power STP250-20/Wd (US) (PV array 02)

Azimuth angle: tracked, Inclination: tracked, Mounting type: Free installation, PV peak power: 100.00 kWp

#### 392 x Suntech-Power STP250-20/Wd (US) (PV array 03)

Azimuth angle: tracked, Inclination: tracked, Mounting type: Free installation, PV peak power: 100.00 kWp

 1 x SC 100HE

 1 x SC 100HE

 1 x SC 100HE

### Technical data

Total number of PV modules:	1176	Energy usability factor:	59.4 %
PV peak power:	294.00 kWp	Performance ratio (approx.):*	73.8 %
Number of inverters:	3	Spec. energy yield (approx.):*	1627 kWh/kWp
Nominal AC power:	300.00 kW	Line losses (in % of PV energy):	---
AC active power:	300.00 kW	Unbalanced load:	0.00 VA
Active power ratio:	102 %	Self-consumption:	40526.06 kWh
Annual energy yield (approx.):*	478.31 MWh	Self-consumption quota:	8.5 %

Sunny Design 2.30.0.R

Signature

\*Important: The yield values displayed are estimates. They are determined mathematically. SMA Solar Technology AG accepts no responsibility for the real yield value which can deviate from the yield values displayed here. Reasons for deviations are various outside conditions, such as soiling of the PV Modules or fluctuations in the efficiency of the PV modules.

## Evaluation of design

### Project name: A 300Kw Solar PV

Project number: 03

Project file: My Design.sdp2

### Location: Iran / Kerman

#### Cell temperature:

Record Low Temperature: -3.00 °C

Average High Temperature: 50.00 °C

Record High Temperature: 70.00 °C

### Part project 1

#### 1 x SC 100HE

PV peak power:	98.00 kWp
Total number of PV modules:	392
Number of inverters:	1
Max. DC power:	103.00 kW
Max. AC power:	100.00 kW
Grid voltage:	20 kV
Nominal power ratio:	105 %



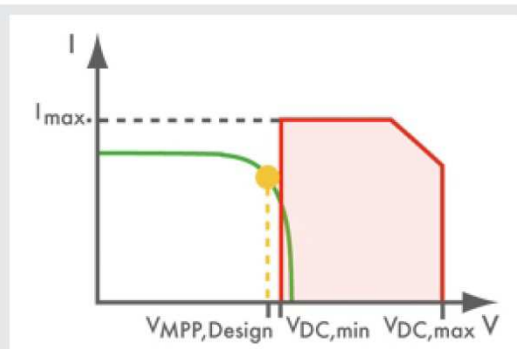
SC 100HE

### Technical data

#### Input A: PV array 01

392 x Suntech-Power STP250-20/Wd (US), Azimuth angle: tracked, Inclination: tracked, Mounting type: Free installation

	<b>Input A:</b>		
Number of strings:	28		
PV modules per string:	14		
Peak power (input):	98.00 kWp		
Typical PV voltage:	387 V	!	
Min. PV voltage:	352 V	!	
Min. DC voltage (Grid voltage 20 kV):	450 V		
Max. PV voltage:	572 V	✓	
Max. DC voltage (PV):	600 V		
Max. current of PV array:	228.2 A	✓	
Max. DC current:	235.0 A		



#### Yield loss

Sunny Design 2.30.0.R



## Evaluation of design

### Project name: A 300Kw Solar PV

Project number: 03

Project file: My Design.sdp2

Location: Iran / Kerman

### Cell temperature:

Record Low Temperature: -3.00 °C

Average High Temperature: 50.00 °C

Record High Temperature: 70.00 °C

### Part project 1

#### 1 x SC 100HE

PV peak power:	98.00 kWp
Total number of PV modules:	392
Number of inverters:	1
Max. DC power:	103.00 kW
Max. AC power:	100.00 kW
Grid voltage:	20 kV
Nominal power ratio:	105 %



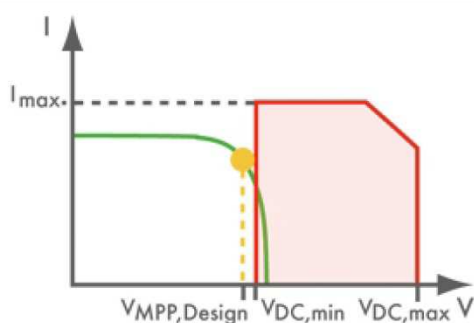
SC 100HE

### Technical data

#### Input A: PV array 02

392 x Suntech-Power STP250-20/Wd (US), Azimuth angle: tracked, Inclination: tracked, Mounting type: Free installation

Number of strings:	28		
PV modules per string:	14		
Peak power (input):	98.00 kWp		
Typical PV voltage:	387 V	!	
Min. PV voltage:	352 V	!	
Min. DC voltage (Grid voltage 20 kV):	450 V		
Max. PV voltage:	572 V	✓	
Max. DC voltage (PV):	600 V		
Max. current of PV array:	228.2 A	✓	
Max. DC current:	235.0 A		



#### Yield loss

Sunny Design 2.30.0.R

## Evaluation of design

### Project name: A 300Kw Solar PV

Project number: 03

Project file: My Design.sdp2

Location: Iran / Kerman

### Cell temperature:

Record Low Temperature: -3.00 °C

Average High Temperature: 50.00 °C

Record High Temperature: 70.00 °C

### Part project 1

#### 1 x SC 100HE

PV peak power:	98.00 kWp
Total number of PV modules:	392
Number of inverters:	1
Max. DC power:	103.00 kW
Max. AC power:	100.00 kW
Grid voltage:	20 kV
Nominal power ratio:	105 %



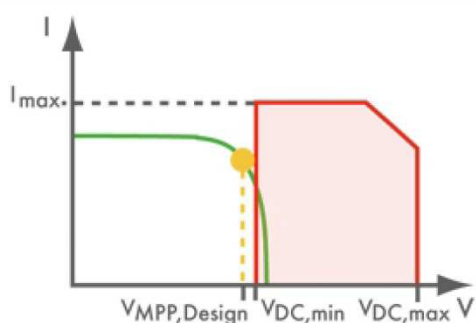
SC 100HE

### Technical data

#### Input A: PV array 03

392 x Suntech-Power STP250-20/Wd (US), Azimuth angle: tracked, Inclination: tracked, Mounting type: Free installation

Number of strings:	28		
PV modules per string:	14		
Peak power (input):	98.00 kWp		
Typical PV voltage:	387 V	!	
Min. PV voltage:	352 V	!	
Min. DC voltage (Grid voltage 20 kV):	450 V		
Max. PV voltage:	572 V	✓	
Max. DC voltage (PV):	600 V		
Max. current of PV array:	228.2 A	✓	
Max. DC current:	235.0 A		



#### Yield loss

Sunny Design 2.30.0.R

## Self-consumption

**Project name: A 300Kw Solar PV**

**Location: Iran / Kerman**

Project number: 03

Project file: My Design.sdp2

### Information on self-consumption

Load profile:

**Commercial business (continuous)**

Commercial businesses with continuous high energy consumption. Examples: stores with intensive cooling systems, parking lots, computing centers, sewage-works.

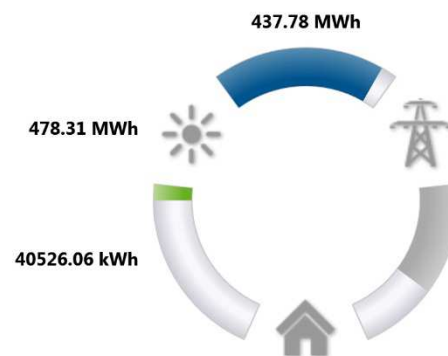
Energy consumption per year: 100000.00 kWh

### Result

Energy yield of the PV plant	<b>478.31 MWh</b>
Grid feed-in	<b>437.78 MWh</b>
Consumption	<b>59473.94 kWh</b>
Self-consumption	<b>40526.06 kWh</b>
Self-consumption quota (in % of PV energy)	<b>8.5 %</b>



Self-consumption quota 8.5 %



The displayed results are estimated values which are derived mathematically. SMA Solar Technology AG accepts no liability for the actual self-consumption which may deviate from the values displayed here. The potential self-consumption essentially depends on individual load patterns, which may deviate from the load profile on which the calculation is based.

Sunny Design 2.30.0.R

## فصل چهارم

### خلاصه و نتیجه گیری

در این پروژه ابتدا با تمرکز بر محوریت انرژی های تجدید پذیر در دنیای فعلی و الزام روی آوری به این انرژی ها شیوه های مختلف تولید برق را (به جز سوخت های فسیلی) بررسی کردیم و در هر بخش تاریخچه ای از این شیوه ی تولید برق و بازده آن و محدودیت ها و مزیت های آن و نیز ظرفیت های استفاده از آن را ذکر کرده ایم. سپس روی مبحث تولید برق خورشیدی تمرکز کردیم و شیوه های مختلف آن را با شرح عملکرد بسط داده ایم. که عبارتند از نیروگاههای کلکتور خورشیدی، ناودان های سهموی گون، بازتاب دهنده های فرسنگل، نیروگاههای برج خورشیدی، نیروگاه خورشیدی با متمرکز کننده ی انکساری، نیروگاه خورشیدی با گیرنده مسطح، نیروگاه خورشیدی با دریافت کننده های مرکزی، دودکش خورشیدی، نیروگاههای خورشیدی هیبرید (دوگانه )، نیروگاههای PV. با تمرکز بر سلول های خورشیدی به بررسی اجزای مختلف این نیروگاهها، مدار معادل های مورد استفاده در تحلیل آن ها، شبیه سازی و بررسی یک نمونه ی عملی از این نوع نیروگاهها پرداختیم. برای این کار از نرم افزار sunny design استفاده کرده ایم و مشخصات یک نمونه ی 300 کیلو وات برای تغذیه ی بار به مدت ده ساعت در شبانه روز در شهر کرمان ارائه شد.



## References

- Noghani, F., & Noghanibehambari, H. (2019). Product Market Competition, Corporate Governance, And Managerial Slack: Evidence from Trade Liberalization. *Journal of Leadership, Accountability and Ethics*, 16(4). <https://doi.org/10.33423/jlae.v16i4.2372>
- Noghanibehambari, H., & Rahnamamoghadam, M. (2020). Is income inequality reflected in consumption inequality in Iran? *Middle East Development Journal*. <https://doi.org/10.1080/17938120.2020.1770488>
- Toranj, M. (2020). A Game Theoretic Approach in Bidding Strategy in Iran Wholesale Electricity Market: Does Increasing Steps Matter for Profit Maximizers? *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3643961>
- Toranj, M., Noghanibehambari, H., Noghani, F., & Tavassoli, N. (2020). A Game Theoretic Approach in Bidding Strategy in Iran Wholesale Electricity Market. *Journal of Applied Business and Economics*, 22(11). <https://doi.org/10.33423/jabe.v22i11.3749>